

T.C.  
HARRAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

FARKLI İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ SENARYOLARI ALTINDA AKDENİZ  
BÖLGESİNDEKİ KURAKLIĞIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Mehmet ŞEKER

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA  
2024

T.C.  
HARRAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

FARKLI İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ SENARYOLARI ALTINDA AKDENİZ  
BÖLGESİNDEKİ KURAKLIĞIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Mehmet ŞEKER

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA  
2024

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
1. GİRİŞ .....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	9
2.1. Küresel Ölçekte Yapılan Çalışmalar .....	9
2.2. Afrika Kıtası .....	12
2.3. Asya Kıtası .....	15
2.4. Amerika ve Avustralya Kıtaları .....	19
2.5. Avrupa Kıtası ve Akdeniz Havzası .....	21
2.6. Türkiye .....	23
3. MATERYAL ve YÖNTEM .....	27
3.1. Çalışma Alanı .....	27
3.2. Veri Setleri .....	29
3.2.1. Gözlem verileri .....	29
3.2.2. Küresel dolaşım modelleri .....	31
3.3. Paylaşılan Sosyoekonomik Yollar .....	34
3.4. İstatistiksel Ölçek İndirgeme .....	37
3.4.1. Atmosferik değişkenlerin belirlenmesi .....	37
3.4.2. Yapay sinir ağları (YSA) .....	39
3.4.3. GCM'lerin performansının değerlendirilmesi .....	40
3.4.4. Çoklu model topluluğu (Multi model ensemble-MME) .....	42
3.5. Meteorolojik Kuraklık .....	43
3.5.1. Standartlaştırılmış Yağış İndeksi .....	44
3.5.2. Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndeksi .....	46
3.6. Uygulama Metodolojisi .....	47
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA .....	51
4.1. Atmosferik Değişkenlerin Seçimi .....	51
4.1.1. Yağış .....	51
4.1.2. Sıcaklık .....	53
4.2. GCM'lerin Performans Değerlendirmesi .....	55
4.2.1. Yağış .....	55
4.2.2. Sıcaklık .....	60
4.3. MME'lerin Performans Değerlendirmesi .....	65
4.3.1. Yağış .....	65
4.3.2. Sıcaklık .....	68
4.4. Gelecek Dönem Yağış ve Sıcaklık Verilerinin Değerlendirilmesi .....	71
4.4.1. Yağış verilerinin zamansal ve mekânsal değişimi .....	71
4.4.2. Sıcaklık verilerinin zamansal ve mekânsal değişimi .....	76
4.5. Meteorolojik Kuraklık Analizi .....	82
4.5.1. PET değerlerinin zamansal değerlendirilmesi .....	82
4.5.2. Kuraklığın zamansal değerlendirilmesi .....	83
4.5.3. Kuraklığın eğilimi .....	88
4.5.4. Kuraklığın mekânsal değerlendirilmesi .....	91
4.6. Tartışma .....	97
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....	103
KAYNAKLAR .....	107
ÖZGEÇMİŞ .....	117

# ÖZET

Doktora Tezi

## FARKLI İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ SENARYOLARI ALTINDA AKDENİZ BÖLGESİNDE KURAKLIĞIN DEĞERLENDİRİLMESİ

**Mehmet ŞEKER**

Harran Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Veysel GÜMÜŞ  
Yıl: 2024, Sayfa: 118

Kuraklık, doğal afetlerin en geniş etki yelpazesine sahip olanlarından biridir ve ekosistemler üzerindeki etkilerinin incelenmesi elzemdir. Bu çalışma, Doğu Akdeniz havzasının önemli bir bölgesi olan Türkiye'nin Akdeniz bölgesinde, Birleşik Modeller Arası Karşılaştırma Projesinin 6. fazı kapsamında yayınlanan 22 farklı küresel dolaşım modellerinden oluşturulan çoklu model topluluğu ile aylık ortalama sıcaklık ve aylık toplam yağış verilerinin gelecek projeksiyonları yapay sinir ağları tabanlı istatistiksel ölçek indirgeme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu projeksiyonlar, 2021-2100 tarihleri için iki farklı senaryo olan SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 çıktıları kullanılarak yapılmıştır. Projeksiyon verileri kullanılarak, yağış ve sıcaklık değişimleri sonucunda kuraklık oluşumu, Standartlaştırılmış Yağış İndeksi ve Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndeksi yöntemleriyle incelenmiştir. Çalışma, 1979-2020 referans dönemi ile yakın gelecek (2021-2060) ve uzak gelecek (2061-2100) olmak üzere iki farklı dönem için yapılmıştır. Sonuçlar, bölgedeki yağışlarda SSP2-4.5 senaryosuna göre %15, SSP5-8.5 senaryosuna göre ise %20 azalma olduğunu göstermektedir. Özellikle, bölgenin kıyı kesimindeki yağışlarda meydana gelen azalmanın diğer bölgelere göre daha fazla olduğu görülmüştür. Yağışlardaki bu azalma, kış ve sonbahar mevsimlerinde diğer dönemlere göre daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Sıcaklık değişiklikleri açısından, tarihi döneme göre SSP2-4.5 senaryosunda +1.0 ile +2.2 °C arasında artış beklenirken, SSP5-8.5 senaryosuna göre ise +1.8 ile +3.1 °C arasında bir artış öngörülmektedir. Geçmiş ve gelecek için elde edilmiş yağış ve sıcaklık verileri kullanılarak hesaplanan kuraklık indis değerleri analiz edilmiş ve çalışma bölgesinin dağlık bölgelerinde meydana gelen kuraklık sıklığındaki artışların kıyı bölgelerine göre daha belirgin olacağı belirlenmiştir. Çalışmada elde edilen kuraklık indis değerleri zamansal ve mekânsal olarak değerlendirilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELEER:** İklim değişikliği, CMIP6, projeksiyon, kuraklık analizi

## ABSTRACT

PhD Thesis

### ASSESSMENT OF DROUGHT IN THE MEDITERRANEAN REGION UNDER DIFFERENT CLIMATE CHANGE SCENARIOS

Mehmet ŞEKER

Harran University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Veysel GÜMÜŞ  
Year: 2024, Page: 118

Drought is one of the natural disasters with the widest range of impacts and it is essential to study its effects on ecosystems. In this study, future projections of monthly average temperature and monthly total precipitation data in the Mediterranean region of Turkey, which is an important region of the Eastern Mediterranean basin, with a multi-model ensemble created from 22 different global circulation models published within the scope of the 6th phase of the Coupled Model Intercomparison Project, were carried out using artificial neural networks-based statistical downscaling method. These projections were made using two different scenarios, SSP2-4.5 and SSP5-8.5 outputs for 2021-2100. Using the projection data, drought occurrence as a result of precipitation and temperature changes was examined by Standardized Precipitation Index and Standardized Precipitation Evapotranspiration Index methods. The study was conducted for the reference period 1979-2020 and for two different periods: near future (2021-2060) and far future (2061-2100). The results indicate a 15% decrease in precipitation in the region according to the SSP2-4.5 scenario and a 20% decrease according to the SSP5-8.5 scenario. In particular, it is observed that the decrease in precipitation in the coastal part of the region is higher than in other regions. This decrease in precipitation is more pronounced in the winter and fall seasons compared to other periods. In terms of temperature changes, an increase between +1.0 and +2.2 °C is expected in the SSP2-4.5 scenario compared to the historical period, while an increase between +1.8 and +3.1 °C is predicted in the SSP5-8.5 scenario. Drought index values calculated using past and future precipitation and temperature data were analyzed and it was determined that the increases in drought frequency in the mountainous regions of the study region will be more pronounced than in the coastal regions. The drought index values obtained in the study were evaluated temporally and spatially.

**KEYWORDS:** Climate change, CMIP6, projection, drought analysis

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca, her konuda bilgi ve deneyimleriyle beni aydınlatan, bu yolculukta rehberliğiyle onur duyduğum danışman hocam Sayın Prof. Dr. Veysel Gümüş'e derin minnettarlığımı ifade etmek benim için bir borçtur.

Doktora eğitimim boyunca akademik gelişimimde katkı sağlayan, Doç. Dr. Oğuz ŞİMŞEK, Prof. Dr. Kasım YENİGÜN, Doç. Dr. M. Hakkı AYDOĞDU hocalarıma, ayrıca Harran Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Hidrolik Laboratuvarı'ndaki değerli arkadaşlarıma içten teşekkürlerimi sunarım.

Tezim için ihtiyaç duyduğum meteorolojik gözlem verilerinin sağlanmasında yardımcı olan Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'ne ve doktora tezim sürecinde YÖK 100/2000 burs programı kapsamında maddi destekleri için Yükseköğretim Kurulu'na şükranlarımı sunuyorum.

Bu zorlu süreçte her zaman yanımda olan, desteklerini asla esirgemeyen eşim Mine'ye, çocuklarıma ve aileme, akademik hayatım boyunca verdikleri maddi ve manevi desteklerden ötürü kalpten teşekkür ederim.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 3. 1. Çalışma alanı.....	28
Şekil 3. 2. Küresel atmosferik dolaşimler (Heffernan, 2016).....	31
Şekil 3. 3. Temsili Konsantrasyon Yolları (RCP)(Dabanlı, 2017).....	34
Şekil 3. 4. Geliştirilen sosyoekonomik yollar (SSP).....	36
Şekil 3. 5. Radyoaktif zorlamada küresel emisyonlar ve küresel ortalama değişimi.....	37
Şekil 3. 6. YSA'a ait tipik model mimarisi.....	40
Şekil 3. 7. Çalışmaya ait uygulamanın akış diyagramı.....	50
Şekil 4. 1. Yağış için CRI kriterine göre GCM'lerin performans değerlendirmesi.....	57
Şekil 4. 2. Yağış için hesaplanan CRI değerlerine göre GCM'lerin istasyon bazlı sıralaması.....	58
Şekil 4. 3. En başarılı 6 GCM'nin aylık yağışları simüle etme becerilerinin değerlendirmesi.....	59
Şekil 4. 4. Sıcaklık için CRI kriterine göre GCM'lerin performans değerlendirmesi.....	62
Şekil 4. 5. Sıcaklık için hesaplanan CRI değerlerine göre GCM'lerin istasyon bazlı sıralaması.....	63
Şekil 4.6. En başarılı dört GCM'nin aylık ortalama sıcaklıkları simüle etme becerilerinin değerlendirmesi.....	64
Şekil 4. 7. Gözlem ve MME'lere ait ortalama yağış verileri arasındaki korelasyon.....	66
Şekil 4. 8. Yağış için ilk altı GCM ve MME'nin CRI sıralaması.....	67
Şekil 4. 9. MME6'nın gözlemlenmiş aylık yağışı simüle etme beceresi.....	68
Şekil 4. 10. Gözlemlenmiş ve MME'lere ait ortalama sıcaklıklar verileri arasındaki korelasyon.....	69
Şekil 4. 11. Sıcaklık için ilk dört GCM'nin ve MME'nin CRI sıralaması.....	70
Şekil 4. 12. MME4'nin gözlemlenmiş aylık ortalama sıcaklığı simüle etme beceresi.....	71
Şekil 4. 13. Yağış değişiminin zamansal dağılımı a) Kıyı ve b) Dağlık bölge.....	72
Şekil 4. 14. İki SSP senaryosuna göre gelecek (2021-2100)'teki aylık ortalama toplam yağışın gözlem (1979-2020) verilerine değişim.....	74
Şekil 4. 15. SSP2-4.5 senaryosu için 2021-2100 döneminde gözlem verilerine göre yıllık ortalama toplam yağış değişiminin mekânsal dağılımı (%).....	75
Şekil 4. 16. SSP5-8.5 senaryosu için 2021-2100 döneminde gözlem verilerine göre yıllık ortalama toplam yağış değişiminin mekânsal dağılımı (%).....	76
Şekil 4. 17. Sıcaklık değişiminin zamansal dağılımı a) Kıyı ve b) Dağlık bölge.....	77
Şekil 4. 18. İki SSP senaryosuna göre gelecek (2021-2100)'teki aylık ortalama toplam sıcaklığın gözlem (1979-2020) verilerine değişimi.....	79
Şekil 4. 19. SSP2-4.5 senaryosu için 2021-2100 döneminin gözlem verilerine göre yıllık ortalama sıcaklık değişiminin mekânsal dağılımı (%).....	80
Şekil 4. 20. SSP5-8.5 senaryosu için 2021-2100 döneminin gözlem verilerine göre yıllık ortalama sıcaklık değişiminin mekânsal dağılımı (%).....	81
Şekil 4. 21. PET değerlerinin zamansal değişim a) Kıyı, b) Dağlık bölge.....	82
Şekil 4. 22. Kıyı bölgesi 3 aylık SPI-SPEI zamansal değişim grafiği.....	84
Şekil 4. 23. Dağlık bölgede 3 aylık SPI-SPEI zamansal değişim grafiği.....	86
Şekil 4. 24. Kıyı bölgesi 6 aylık SPI-SPEI zamansal değişim grafiği.....	87
Şekil 4. 25. Dağlık bölgede 6 aylık SPI-SPEI zamansal değişim grafiği.....	87
Şekil 4. 26. Kıyı bölgesi 12 aylık SPI-SPEI zamansal değişim grafiği.....	88
Şekil 4. 27. Dağlık bölgede 12 aylık SPI-SPEI zamansal değişim grafiği.....	88
Şekil 4. 28. (a) SPI3-SPEI3, (b) SPI6-SPEI6 ve (c) SPI12-SPEI12 göre indeks eğiminin dağılımı.....	90
Şekil 4. 29. SPI3 için kuraklık oluşumunun mekânsal değişimi (%) (SPI<-1).....	91
Şekil 4. 30. SPI6 için kuraklık oluşumunun mekânsal değişimi (%) (SPI<-1).....	92
Şekil 4. 31. SPI12 için kuraklık oluşumunun mekânsal değişimi (%) (SPI<-1).....	93
Şekil 4. 32. SPEI3 için kuraklık oluşumunun mekânsal değişimi (%) (SPEI<-1).....	94
Şekil 4. 33. SPEI6 için kuraklık oluşumunun mekânsal değişimi (%) (SPEI<-1).....	95
Şekil 4. 34. SPEI12 için kuraklık oluşumunun mekânsal değişimi (%) (SPEI<-1).....	96

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3. 1. Çalışmada kullanılan meteorolojik istasyonlarına ait coğrafi bilgiler .....	30
Çizelge 3. 2. Küresel dolaşım modelleri .....	33
Çizelge 3. 3. Bağımsız atmosferik değişkenler .....	38
Çizelge 3. 4. SPI/SPEI değerlerine göre kuraklık sınıflandırması (McKee ve ark., 1993).....	44
Çizelge 4. 1. Yağış için istasyon bazlı baskın tahminleyiciler .....	52
Çizelge 4. 2. Sıcaklık için istasyon bazlı baskın tahminleyiciler .....	54
Çizelge 4. 3. CMIP6 modellerinin performans kriterlerine göre yağışı tahmin etme becerileri.....	56
Çizelge 4. 4. CMIP6 modellerinin performans kriterlerine göre sıcaklığı tahmin etme becerileri.....	61



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

AR4	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Panelinin 4. Değerlendirme Raporu
AK	Aşırı kurak
AN	Aşırı nemli
AR5	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin 5. Değerlendirme Raporu
AR6	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin 6. Değerlendirme Raporu
CC	Pearson Korelasyon katsayısı
CMIP	Birleşik Model Karşılaştırma Projesi
CRI	Kapsamlı derecelendirme indeksi
ÇK	Çok kurak
ÇN	Çok nemli
EIA	Erinç çoraklık indeksi
FAR	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin 1. Değerlendirme Raporu
GCM	Küresel İklim Modeli
HK	Hafif kurak
HN	Hafif nemli
IPCC	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli
KGE	Kling-Gupta Verimlilik Metriği
md	Değiştirilmiş uyumluluk indeksi
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MME	Çoklu Model Topluluğu
nRMSE	Normalize Edilmiş Kök Ortalama Kare Hata
NSE	Nash-Sutcliffe etkinlik katsayısı
OK	Orta kurak
ON	Orta nemli
PCI	Pinne Birleşimli İndeksi
PET	Potansiyel evapotranspirasyon
RCM	Bölgesel İklim Modeli
RDI	Keşif Kuraklık Endeksi
SAR	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin 2. Değerlendirme Raporu
Sc-PDSI	Kendiliğinden Kalibre Edilen Palmer Kuraklık İndeksi
SPEI	Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndeksi
SPI	Standartlaştırılmış Yağış İndeksi
SRI	Standartlaştırılmış Akış İndeksi
SSI	Toprak Nemi İndeksi
SSP	Paylaşılan Sosyoekonomik Yollar
SVM	Destek Vektör Makineleri
TAR	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Panelinin 3. Değerlendirme Raporu
UG	Uzak gelecek
UNDDR	Birleşmiş Milletler Afet Risk Azaltma Ofisi
UNEP	Birleşmiş Milletler Çevre Örgütü
UNEP-AI	UNEP Çoraklık İndeksi
WCRP	Dünya İklim Araştırma Programı
WEM	Ağırlıklı Topluluk Ortalama
WMO	Dünya Meteoroloji Örgütü
YG	Yakın gelecek
YSA	Yapay Sinir Ağları

## 1. GİRİŞ

İklim değışikliği, 20. yüzyılın son çeyreğinden itibaren yerkürenin farklı bölgelerinde, ekstrem hava olaylarına, buzulların erimesine, deniz seviyelerinin yükselmesine ve biyoçeşitliliğın azalması gibi durumlara neden olmaktadır. Değışen iklimsel koşullarıyla birlikte iklim kaynaklı doğal afetlerin sayısı ve sıklığında artışlar meydana gelmektedir. Global ölçekte tüm canlıları hayati derecede etkileyen iklimlerdeki bu hızlı değışimler, dünyadaki tüm ülke yönetimlerinin ve bilim dünyasının önemli bir gündem konusu haline gelmiştir.

İklim, belli bir bölgede meydana gelen hava olaylarının uzun süreli ortalaması olarak tanımlanır (Şener, 2021). İklim değışikliği ise, bu zaman diliminde meydana gelen hava olaylarının ortalama değerlerindeki istatistiksel olarak anlamlı sapmalardır (Türkeş, 2008). İklim, yerkürenin çekirdeğine doğru artan sıcaklıkla birlikte magmada meydana gelen konveksiyonel hareketler (volkanik patlamalar ve tektonik hareketler) sonucu karasal alanların değışmesi, atmosfer ile olan doğal etkileşimler (Güneş patlamalarının salınımı, dünyanın eksen kayması gibi astronomik döngüsel değışimler) ve insan kaynaklı faktörlerle değışim geçirir (Çiner ve Sarıkaya, 2013; Nacar, 2020). Bu hususta Dünya'nın, 4,6 milyar yıllık tarihinde bir dizi buzul çağı ve ısınma dönemlerinin yaşandığı, bu durumun kutup bölgelerinden alınan buzul karotları ve derin deniz sondajlarıyla çıkarılan sedimanter kayaların detaylı incelemeleriyle ortaya çıktığı bilinmektedir. Ayrıca, yaklaşık 4 milyar yıl önce Dünya'nın sıcaklık ortalamasının, günümüzdeki değerinden (17 °C'den) çok daha yüksek (yaklaşık 28-29 °C) olduğu belirtilmiştir. Bunun yanında, Dünya'nın farklı zaman dilimlerinde beş büyük buzullaşma dönemi yaşandığı tespit edilmiştir (Çiner ve Sarıkaya, 2013). Yerkürede doğal sebeplerden kaynaklanan iklim değışikliklerinin, uzun dönemlerde, yani yüz binlerce yıl veya milyonlarca yıl içinde gerçekleştiği belirtilmiştir.

Yeryüzüne Güneş'ten gelen enerjinin %51'i doğrudan yeryüzü tarafından absorbe edilirken, %19'u atmosfer ve bulutlar tarafından tutulur. Geriye kalan enerjinin %4'lük bir kısmı albedo etkisiyle yansıtılırken, %20'si bulutlar tarafından

tutulur ve %6'sı atmosferdeki geri yansıma ile uzaya geri gönderilir (Dabanlı, 2017). Atmosferdeki bu enerjiyi büyük oranda tutan etkenler, atmosferde bulunan gazlar (Azot: N<sub>2</sub>, Oksijen: O<sub>2</sub>, Argon: Ar, Karbondioksit: CO<sub>2</sub>, Su buharı: H<sub>2</sub>O vd.) oluşturur. Bu gazlar, atmosferde belirli oranlarda bulunur, ancak, bu gazlardan bazılarının atmosferde ısı tutma kapasitesi yüksek olduğu için, bunlara sera gazı da denmektedir. Atmosferdeki bu sera gazlarının (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC'ler, PFC'ler ve SF<sub>6</sub>) konsantrasyonlarındaki artışlar, yeryüzünden geri yayılacak güneş enerjisinin bir kısmını atmosferde tutarak, yerkürenin daha fazla ısınmasına neden olur ve bu durum sera etkisi olarak adlandırılır (Özdemir ve ark., 2020). Bu gazların çoğu, sanayi faaliyetleri, karbon esaslı fosil yakıt kullanımı, tarımsal faaliyetler ve ormansızlaşma gibi insan faaliyetleri sonucu atmosfere salınır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC) 2021 yılında yayınladığı rapora göre, 1850'den bu yana sera gazlarının konsantrasyonlarındaki artışların insan faaliyetlerinden kaynaklandığı vurgulanmıştır. Atmosferdeki bu gazların konsantrasyonlarındaki artışlar, artan ısınmaya bağlı olarak iklim sisteminin geri besleme mekanizmasını bozarak hem ekosistemler hem de insanlık için önemli bir tehdit oluşturmaktadır (IPCC, 2021; Ayugi ve ark., 2022). Bu tehditler, dünyanın farklı bölgelerinde ekosistemleri çeşitli şekillerde etkileyen iklim değişikliği olarak kendini göstermektedir. İklim değişikliği, kuraklık, sel, fırtına ve sıcak hava dalgaları gibi doğal afetlerin etkilediği alanlarda ve bunların şiddetlerinde önemli değişimlere neden olmaktadır. Bu doğal afetlerin artışı, insanların yaşamını ciddi şekilde etkilemekte, hatta bazen kitlesel ölümlere yol açabilmektedir. Dolayısıyla, iklim değişikliği, 21. yüzyılda insanlığın karşılaştığı en büyük çevresel tehditlerden biri olarak değerlendirilmektedir (Noor ve ark., 2019).

Günümüzde, artan etkileri nedeniyle iklim değişikliği, küresel çapta birçok iklim araştırma kuruluşu ve bilim insanı tarafından önemli bir konu olarak tartışılmaktadır. Küresel ölçekte, iklim değişikliğinin etkileri artan bir trend göstermektedir. Bu durum, gelecekteki iklim değişikliklerinin hem küresel hem de bölgesel düzeyde değerlendirilmesi ve etkilerinin hafifletilmesi çalışmaları açısından büyük bir önem arz etmektedir (Szczepanski ve Urry, 2010; Bouwer, 2011; Homsı ve ark., 2019). Bu bağlamda, iklim değişikliğinin küresel düzeyde yol açabileceği çevresel, sağlık,

ekonomik kalkınma, tarım, gıda ve temiz suya erişim gibi sorunların bilimsel açıdan araştırılması ve bu sorunlara karşı alınacak önlemlerin raporlanması son derece önemlidir. Bu çabaların bir sonucu olarak, Birleşmiş Milletler'in iki ana kuruluşu olan Dünya Meteoroloji Örgütü (World Meteorological Organization-WMO) ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı (United Nations Environment Programme-UNEP) tarafından 1988 yılında IPCC kurulmuştur. Bu kuruluş, 1990 yılında yayınlanan ilk kapsamlı değerlendirme raporu (FAR) ile başlayarak, 1995'te 2. Değerlendirme Raporu (SAR), 2001'de 3. Rapor (TAR), 2007'de 4. Rapor (AR4), 2014'te 5. Rapor (AR5) ve en son olarak 2021'de yayınlanan 6. Değerlendirme Raporu (AR6) dahil olmak üzere, günümüze kadar bir dizi iklim değerlendirme raporu yayınlamıştır. Bu raporlarda, iklim değişikliği ile alakalı küresel ölçekte en güncel bilimsel, teknik ve sosyo-ekonomik bilgiler derlenerek ve değerlendirilerek tüm insanlığa sunulmaktadır.

Gelecekte iklim değişikliğinin yer küreyi hangi boyutlarda etkileyeceği konusunda birçok kurum ve kuruluş tarafından önemli çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmalardan biri, iklim eğilimlerinin tespitinde önemli bir aşama olan iklim modelleme aşamasıdır (Nacar, 2020). İklim modelleme çalışmalarında, doğal sistemlere etki eden olası sera gazı konsantrasyonlarına bağlı ısınım sal zorlamaları dikkate alan emisyon senaryoları göz önünde bulundurulmaktadır. Bu senaryolar, IPCC'nin her yeni çalışma sürecinde güncellenerek, insan faaliyetlerinin doğadaki tüm sistem dinamiklerine etkisini içerecek şekilde düzenlenir. İklim modelleme çalışmalarında kullanılan temel araçlardan biri Küresel Dolaşım Modelleri (Global Circulation Model-GCM) olarak bilinir. Bu modeller, iklimsel değişkenler arasındaki etkileşimleri ve bu değişkenler arasındaki ileri ve geri beslemeleri matematiksel olarak ifade edilerek, küresel iklim değişikliğini tahmin etmek için geliştirilmiştir (Biberoğlu, 2017). Son yıllarda GCM 'lerde yapılan geliştirmelere rağmen, özellikle bölgesel ölçekteki süreçlerin temsiliyetindeki eksiklikler ve başlangıç koşullarının yanı sıra kaba çözünürlük gibi nedenlerle hala bazı önemli bölgesel yanlışlıklar ve eksiklikler bulunmaktadır (Almazroui ve ark., 2021). Bu belirsizlikleri ve zayıflıkları minimize etmek ve tüm modeller arasında genel bir çerçeve oluşturmak için Dünya İklim Araştırma Programı (World Climate Research Programme-WCRP) tarafından düzenlenen Birleşik Modeller Arası Karşılaştırma Projesi (Coupled Model

Intercomparison Project-CMIP) oluşturulmuştur. Bu CMIP fazları, IPCC'nin iklim değerlendirme raporlarının önemli bir destekçisi olarak kullanılmaktadır (Su ve ark., 2021). Bu proje kapsamında daha önce CMIP3, CMIP5, en sonuncusu olarak da CMIP6 safhası kullanıma açılmıştır ve her bir faz, kendisinden önceki faza göre daha gelişmiş ve daha çok etki parametresi içermektedir. Bu kapsamdaki en son nesil olan CMIP6 fazı, yayınlanan GCM çıktılarında, gelecekteki iklim projeksiyonunu oluşturmak için önemli olan ve paylaşılan sosyoekonomik yolları (Shared Socioeconomic Pathways-SSP) diye adlandırılan yaklaşımları dikkate alarak, önemli ölçüde iyileştirilmiş emisyonlar, arazi kullanım senaryoları, iyileştirilmiş model değişkenleri ve fiziksel süreçleri içermektedir. (Riahi ve ark., 2017; Mishra ve ark., 2020; Sharma ve ark., 2021). Ayrıca, CMIP6 kapsamında yayınlanan GCM'ler, daha iyi uzamsal çözünürlükler ve iyileştirilmiş deneylerle daha az yanlılık ve sinoptik süreçlere sahip olduğu belirtilmektedir (Eyring ve ark., 2016; Salehie ve ark., 2022b).

CMIP fazları kapsamında sunulan GCM'ler, iklimi düşey düzlemde 10 ila 80 farklı basınç seviyesinde ve yatay düzlemde 200 ila 600 km aralıklı alansal çözünürlüklerle üç boyutlu sayısal ağlar yardımıyla tanımlar. GCM'lerin oldukça kaba çözünürlüğü, çoğu bölgesel ölçekte meydana gelen meteorolojik olayların modellenmesinde yetersiz kalır ve bu sebeple doğrudan kullanılamaz. GCM simülasyonları, yaklaşık 200 km'nin altındaki mekânsal ölçekler ile alakalı güvenilir bilgi sağlayamadığından, etki değerlendirmesi ve uyum planlaması için kaba çözünürlüklü GCM değişkenlerinin yerel ölçeklere indirilmesi önemlidir (Su ve ark., 2016). GCM'lerin büyük ölçekli atmosferik verilerini küçük ölçekli meteorolojik verilere dönüştürmek için çeşitli ölçek indirgeme yöntemlerine ihtiyaç duyulur (Wilby ve ark., 2002). Ölçek indirgeme teknikleri, iklim çalışmaları ve politika oluşturma için yerel veya bölgesel ölçekte kullanılabilen GCM'lerin daha iyi çözünürlükte çıktılarını elde etmek amacıyla kullanılır (Ahmed ve ark., 2018; Hadi Pour ve ark., 2019; Homsı ve ark., 2019; Shiru ve ark., 2019). Bu teknikler istatistiksel ve dinamik ölçek indirgeme olmak üzere iki alt kategoriye ayrılır (Sachindra ve ark., 2018). Dinamik ölçek indirgeme, GCM'lerin çıktılarını sınır şartı olarak kabul eden ve daha düşük mekânsal çözünürlükte bölgesel iklim tahminleri yapabilen bir modelleme biçimidir. İstatistiksel ölçek indirgeme yöntemleri, gözlem verileri ile GCM verileri arasında

kurulan istatistiksel ilişkiye dayanan modelleme yöntemleridir (Nacar ve ark., 2021). İstatistiksel ölçek indirgeme yöntemleri, dinamik ölçek indirgeme yöntemlerine göre daha düşük hesaplama maliyetleri, daha hızlı ve basit uygulanabilirlik sunar (Xu ve ark., 2020).

İstatistiksel ölçek indirgeme yöntemleri üç ana gruba ayrılır: hava sınıflandırma, hava durumu üreticileri ve transfer fonksiyonları (Nacar, 2020). Uygulanabilirlik açısından en yaygın kullanılan istatistiksel küçültme yöntemi transfer fonksiyonlarıdır (Chen ve ark., 2011). Bu transfer yöntemleri arasında yapay zekâ teknikleri ve çeşitli regresyon metotları (SDSM, destek vektör makineleri (SVM), çoklu doğrusal veya doğrusal olmayan regresyon, Random forest, M5Tree vb. bulunmaktadır (Nacar, 2020). Yapay Sinir Ağları (YSA), büyük ölçekli GCM çıktıları ile havza ölçeğindeki iklim değişkenleri arasındaki en karmaşık ilişki düzeyini belirleme yeteneğine sahiptir (Saraf ve Regulwar, 2016).

Günümüzde, özellikle 21. yüzyılın son çeyreğinden itibaren gelişen teknoloji sayesinde atmosferde yapılan kapsamlı gözlemler ve bu gözlemlere dayalı geçmiş ve gelecek iklim modelleme çalışmaları önemli bir hız kazanmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde Akdeniz Havzası, Kuzey Avrupa, Kuzey Doğu Amerika ve Güney Afrika gibi birçok bölgenin iklim değişikliği açısından özellikle hassas olduğu belirtilmiştir (Cook ve ark., 2020; Coppola ve ark., 2021b; Fu ve ark., 2023). Söz konusu bölgeler arasında Türkiye, Balkanlar, İber Yarımadası ve Kuzey Afrika, küresel yıllık ısınma oranına kıyasla %40-50 daha yüksek ısınma oranlarına ulaşacağı tahmin edilmektedir (IPCC, 2021). Son yüzyılda Akdeniz bölgesinde ortalama sıcaklığın 1.5 °C arttığı ve bu bölgede genellikle yağışların son 50 yılda belirgin bir azalma eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir (Alpert ve ark., 2008; Dubrovský ve ark., 2013). Akdeniz Bölgesi'nde yağışların azalması, ortalama sıcaklıkların ise artacağı öngörülmektedir. Ayrıca, özellikle Türkiye'nin coğrafi bölgesi olarak Akdeniz bölgesinde yapılan bir çalışma, ortalama yüzey sıcaklığındaki artışın yaz aylarında daha belirgin olduğunu, kış mevsimindeki artışın ise daha az olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, yağışın hemen hemen tüm mevsimlerde azaldığı belirtilmiştir (Ozturk ve ark., 2015). Doğu Akdeniz bölgesinde, özellikle kış aylarında %20-%25 arasında bir yağış azalmasının beklendiği

bildirilmiştir (Tuel ve Eltahir, 2020). Akdeniz Bölgesi, Kuzey Afrika'nın kurak karasal iklimi ile Orta Avrupa'nın ılıman yağışlı iklimi arasında bir geçiş bölgesi olması nedeniyle, orta enlem fırtına yollarının veya subtropikal yüksek basınç hücrelerinin kayması gibi genel atmosferik dolaşımdaki değişikliklerden önemli derecede etkilenmektedir. Bu durum, iklim değişikliğinde belirgin bir etkiye sahiptir (Giorgi ve Lionello, 2008).

Günümüzde, küresel çapta yağış ve sıcaklıkta hem mekânsal hem de zamansal açıdan önemli değişimler yaşandığına dair bir kabul bulunmaktadır (Şener, 2021). Yağış ve sıcaklık değişiklikleri, yeraltı su seviyelerinde değişimlere, su potansiyelinde artış ya da azalmaya, aşırı yağışlar nedeniyle taşkınlara, kuraklıklara ve aşırı sıcak hava dalgalarına yol açarak çeşitli etkiler doğurmaktadır. Küresel iklim değişikliğinin kendini en belirgin şekilde gösterdiği durumlardan biri kuraklıktır. Kuraklığın yapısının özellikle 1950'lerden günümüze doğru artan bir eğilim gösterdiği vurgulanmaktadır (Yeşilköy ve Şaylan, 2022). Kuraklıklar genellikle dört ana türe ayrılır: meteorolojik, hidrolojik, tarımsal ve sosyoekonomik kuraklık (Avşaroğlu, 2023). Meteorolojik kuraklık, yağış noksanlığı ile başlar; hidrolojik kuraklık, akarsu akımlarında azalma ve yeraltı su seviyelerindeki düşüşle karakterize olur; tarımsal kuraklık ise toprak neminde azalma ve ürün veriminde düşüşlerle ortaya çıkar. Sosyoekonomik kuraklık, kuraklıklar sonucunda toplumun su arz-talep dengesinin bozulması ve buna bağlı olarak sosyoekonomik yapının olumsuz etkilenmesi şeklinde tanımlanabilir (Cook ve ark., 2020; Wang ve ark., 2021; Zeng ve ark., 2022). Kuraklık, genellikle belirli bir mevsimsel veya yıllık periyottaki ortalama yağış miktarlarındaki azalmalarla ilişkilidir, ancak sıcaklık, rüzgâr, bağıl nem ve bulutluluk gibi diğer faktörler de kuraklık oluşumunda önemli rol oynar (Mishra ve Singh, 2010). İklimsel anormalliklerden kaynaklanan kuraklıklar, insanlığı etkileyen en ciddi doğal felaketlerden biri olarak kabul edilir (Dai, 2010; Zhao ve Dai, 2021). Kuraklık, diğer doğal afetler gibi hızlı olmayan, kronik bir doğal afet olarak kabul edilir (Wang ve ark., 2021) ve sinsi gelişen bu doğal olay, kademeli ve artan etkileriyle ekonomik açıdan en yıkıcı doğal felaketler arasında yer alır (AghaKouchak, 2014; Zeng ve ark., 2022) Bugün dünyanın yaklaşık %47'si kuraklık tehdidi altında bulunmakta (Koutroulis, 2019; Li ve ark., 2022) ve 120'den fazla ülke bu tehditle karşı karşıyadır

(Wang ve ark., 2021). Yirminci yüzyılının başından günümüze kuraklık frekanslarında ve sürelerinde artışlar meydana gelmiştir. Ayrıca, 1970-2019 yılları arasında kuraklık nedeniyle 650.000 ölüm gerçekleştiği belirtilmektedir (Aksoy, 2023). Dünya genelinde kuraklıklar, sosyoekonomik gelişimi ciddi şekilde kısıtlayan en önemli faktörlerden biri olarak ortaya çıkmaktadır (Li ve ark., 2022). İklim değişikliğinin hassas noktalarından biri olan Akdeniz havzasının, gelecekte ısınmaya bağlı bu kuraklıklardan etkileneceği açıktır. IPCC'nin 2018'deki özel raporuna göre Akdeniz bölgesinin, iklim değişikliğinden olumsuz etkilenen bölgeler arasında yer aldığı, ayrıca bölgenin kuraklık riskinin önemli olduğunu vurgulanmaktadır (Mesta ve ark., 2022). Ayrıca, bölgenin gelecekte şiddetlenmesi muhtemel kuraklıklara sosyoekonomik olarak en fazla maruz kalan bölgelerinden biri olacağı kabul edilmektedir (Gu ve ark., 2020). Akdeniz havzasının güney bölgelerindeki kuraklık sıklıklarındaki artış riskinin kuzey bölgelerinden daha fazla olduğu belirtilmektedir (Essa ve ark., 2023). Bu bağlamda, Akdeniz havzasının güneydoğusunda bulunan Türkiye'nin Akdeniz coğrafi bölgesi, bu risk bölgesinin merkezinde yer almaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, iklim değişikliği bakımından hassas olarak nitelendirilen Akdeniz bölgesinin doğusunda yer alan Türkiye'nin Akdeniz coğrafi bölgesindeki 28 meteorolojik gözlem istasyonundan elde edilen aylık toplam yağış ve aylık ortalama sıcaklık değerlerini kullanarak, istatistiksel ölçek indirgeme yöntemiyle iklim projeksiyonları gerçekleştirmiştir. İklim projeksiyonu neticesinde elde edilen yağış ve sıcaklık değerlerine göre bölgenin meteorolojik kuraklığı zamansal ve mekânsal olarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla, CMIP6 kapsamındaki 22 GCM 'ye ait atmosferik veriler ile istasyon bazında ölçülen yağış ve sıcaklık verileri arasında YSA yöntemi kullanılarak tahmin modelleri oluşturulmuştur. İstasyon ölçeğinde 1979-2020 yılları arasında gözlenen yağış ve sıcaklık verilerini tahmin etme konusunda en iyi performans sergileyen GCM'ler belirlenmiştir. Daha sonra, en iyi performansı sergileyen bu GCM'ler kullanılarak tüm bölgenin sıcaklık ve yağış verilerini tahmin etmek üzere Çoklu Model Topluluğu (Multi Model Ensemble-MME) oluşturulmuştur. Yağış ve sıcaklık için ayrı ayrı oluşturulan bu MME'ler ile, bölgenin iki farklı SSP senaryosuna (SSP2-4.5 ve SSP5-8.5) göre gelecek dönem (2021-2100) için projeksiyonlar yapılmıştır. Yapılan projeksiyon verileri ışığında, bölgenin istasyon

bazında 3, 6 ve 12 aylık zaman ölçeklerindeki meteorolojik kuraklıkları zamansal ve mekânsal açıdan değerlendirilmiştir.



## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, iklim değişikliğinin yağış ve sıcaklık üzerinde etkileri belirlenmesi üzerine küresel çapta ve Akdeniz havzası ve Türkiye’ de yapılmış güncel önemli çalışmaların bir kısmı özetlenmiştir.

### 2.1. Küresel Ölçekte Yapılan Çalışmalar

Cook ve ark. (2020), CMIP6 kapsamında yayınlanan GCM'lere ait dört farklı SSP (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) senaryosunun çıktıları ile küresel ölçekte hidrolojik döngüdeki (yağış, toprak nemi ve akış) değişimlerini analiz etmişlerdir. Küresel ölçekte yapılan bu değerlendirmede Kuzey Batı Amerika, Orta Amerika, Avrupa ve Akdeniz, Amazon, Güney Afrika, Çin, Güneydoğu Asya ve Avustralya bölgelerinin kuraklığa güçlü eğilim gösteren noktalar olarak belirtilmiştir.

Ukkola ve ark. (2020), CMIP6 kapsamında sunulan GCM çıktıları kullanılarak gerçekleştirdikleri bu çalışmada, 2051-2100 yılları arasında tüm dünyada kuraklık karakterizasyonunun nasıl değişeceğini araştırmışlardır. Çalışmada elde edilen bulgular, Amazon, Akdeniz ve Kuzey yarım küredeki orta ve yüksek enlem bölgelerinde kuraklık durumlarında gelecekte güçlü değişimlerin meydana geleceğini ortaya koymuştur.

Spinoni ve ark. (2020), bölgesel iklim modeli (Regional Climate Model-RCM) ve GCM'lerden oluşan geniş bir model topluluğunun RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları altında yapılan projeksiyon verileri ışığında SPI ve SPEI kuraklık indeksleri ile 1981-2100 arası tüm yer kürenin kuraklık karakteristiklerini (frekans, süre, şiddet) incelemişlerdir. Edilen sonuçlara göre, SPI endeksine dayanarak küresel düzeyde her iki senaryo altında kuraklıklarda %15'lik bir artış öngörülmektedir. SPEI endeksine göre ise RCP4.5 senaryosunda %47'lik, RCP8.5 senaryosunda ise %49'a varan artışlar tespit edilmiştir. Çalışmada özellikle RCP8.5 senaryosuna göre, Güney Amerika,

Akdeniz bölgesi, Güney Afrika, Güneydoğu Çin, Japonya ve Güney Avustralya'da daha sık ve şiddetli kuraklıkların yaşanacağını öngörülmüştür.

Wang ve ark. (2021), CMIP6 kapsamındaki GCM'lere ait çıktılar kullanılarak yaptıkları bu çalışmada, 1850-2014 yılları arası referans dönemi ve 2015-2100 yılları gelecek dönemi olmak üzere, SPI, SPEI ve Standartlaştırılmış Akış İndeksi (Standardized Runoff Index-SRI) kuraklık indeksleriyle küresel ölçekte kuraklık karakterizasyonu değerlendirmişlerdir. Çalışmada, 21. yüzyılda küresel kuraklığın sıklığının, süresinin ve yayılımının çoğu bölgede artacağı vurgulanırken, ayrıca kuraklığı etkileyen en önemli faktörün evapotranspirasyon olacağını belirtilmiştir. Bu bulgular, gelecekte kuraklıkla mücadelede su döngüsünün önemli bir bileşeni olan evapotranspirasyonun kritik rolünü vurgulamakta ve iklim değişikliğinin kuraklık üzerindeki etkilerini net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Coppola ve ark. (2021b), bir takım RCM, CMIP5 ve CMIP6 kapsamında yayınlanan GCM'lerin çıktılarını kullanarak, küresel düzeyde çeşitli iklimsel parametrelerin (ekstrem yağış, sıcak hava dalgaları ve kuraklık frekansı) değişimini incelenmişlerdir. Çalışmada, Güney Amerika'daki la Plata havzası, Afrika'daki Kongo havzası, kuzey doğu Amerika, kuzey doğu Avrupa, Hindistan ve Çin gibi bölgelerde taşkınlara eğilimin artacağı belirtilmiştir. Ayrıca, Orta Amerika, Amazon, Akdeniz, Güney Afrika ve Avustralya gibi bölgelerde de kuraklık açısından hassas noktalar tespit edilmiştir.

Asadi Zarch (2022) tarafından CMIP5 kapsamında yayınlanan GCM'lerin RCP5-8.5 senaryo çıktıları kullanılarak yapılan bu çalışmada, Keşif Kuraklık İndeksi (Reconnaissance Drought Index-RDI) ile mevsimsel kuraklık trendleri incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları, nemli bölgelerin alan olarak küçüldüğünü ve geçmişten günümüze gözlenen kuruma eğiliminin gelecekte de devam edeceğini göstermektedir.

Zeng ve ark. (2022), CMIP6 kapsamında yayınlanan GCM'lere ait SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryo çıktıları kullanarak 1900-2100 yılları arası yapılan projeksiyon verileri ışığında SPI, SPEI, standardize toprak nemi indeksi (Standardized Soil

Moisture Index-SSI), SRI indeksleri ile meteorolojik, hidrolojik ve tarımsal kuraklık karakterizasyonlarını küresel ölçekte değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonuçları, 1901'den 2100'e kadar dünya genelinde farklı türdeki kuraklık olaylarının daha geniş mekânsal kapsamda, daha uzun sürelerde ve daha fazla şiddetle meydana geldiği belirtilmiştir. Bu çalışmada, kuraklıkta en büyük artışların SPEI indeksinde göre görüldüğünü belirtilmiştir.

Tabari ve Willems (2022) tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, 1.5°C, 2°C ve 3°C ısınma seviyelerinin küresel ölçekteki kuraklık etkileri, bir ve üç değişkenli kopula analizi ile incelenmiştir. Çalışmada, CMIP6 kapsamında yayınlanan 25 GCM çıktıları ile yapılan iklim simülasyonlarına dayalı olarak SSI kuraklık indeksi ile 3, 6 ve 12 aylık ölçeklerdeki kuraklık özellikleri değerlendirilmiştir. Üç değişkenli analiz sonuçlarına göre, küresel arazinin yaklaşık %63 ila %91'i tekrarlayan kuraklıklara maruz kalacakken, tek değişkenli analizde bu oran %41 ila %56'ya düşmektedir. Tek değişkenli kuraklık analizi, Orta Amerika, doğu Kuzey Amerika, Akdeniz, Amazon, Güney Afrika ve Avustralya'yı sıcak nokta bölgeleri olarak tanımlamaktadır. Bu bölgelere ek olarak, tek değişkenli analize göre Afrika ve Doğu Asya, kuraklık tekerrür periyotlarının iki katına çıkacağı ve kuraklıktan ciddi şekilde etkilenen bölgeler olarak kabul edilmektedir.

Wu ve ark. (2022), küresel ölçekte 8655 havza için CMIP6 arşivinden alınan 15 GCM'ye ait MME modelinin 1.5–3.0 °C ısınma senaryoları altında yapılan projeksiyon verilerine göre meteorolojik ve hidrolojik kuraklık koşullarındaki değişimleri incelemişlerdir. Araştırmanın sonuçlarına göre hem meteorolojik hem de hidrolojik kuraklık koşulları (süre, şiddet vd.) Kuzey Batı Amerika, Güney Amerika, Akdeniz, Güney Afrika, Doğu Asya ve Avustralya bölgelerinde artış gösterecektir. Ayrıca, çoğu bölgede meteorolojik kuraklıktan hidrolojik kuraklığa geçiş sürecinde kuraklık koşullarının daha şiddetli olacağı vurgulanmıştır.

Fu ve ark. (2023), küresel ölçekteki kuraklık olaylarının 2031-2060 yılları arası karakteristik özelliklerini tarihsel döneme (1981-2010) göre değişimlerini, iki SSP (SSP2-4.5 ve SSP5-8.5) senaryo çıktıları kullanarak değerlendirmişlerdir. Bu

kapsamda, gelecekteki yağışların Kanada, Çin ve kuzey yüksek enlem bölgelerindeki kuraklık olaylarını hafifleteceği, buna karşın Amazon, Avustralya, Orta Amerika, Şili, Akdeniz ve Güney Afrika'daki kuraklık olaylarını yoğunlaştıracağı belirtilmiştir. Ayrıca, hava sıcaklığı eğilimlerinin bu kuraklık olaylarını daha da kötüleştireceği ifade edilmiştir.

Ji ve ark. (2023), CMIP6 kapsamındaki bir dizi GCM çıktısı kullanılarak, küresel ısınmanın 1.5 °C, 2 °C, 3 °C, 4 °C düzeylerinde olması durumunda SPEI3 indeksine göre kuraklık karakterizasyonu değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonuçlarına göre, 3°C ısınma senaryosu altında küresel anlamda kuraklık özellikleri en yüksek büyüme oranına sahip olup, bunu sırasıyla 4 °C, 2 °C ve 1.5 °C ısınma senaryoları takip etmektedir. Kuzey ve Güney Amerika, Avrupa, Kuzey ve Güney Afrika, Asya ile orta Avustralya'da 3 °C ve 4 °C ısınma durumlarında kuraklık şiddetinde güçlü artışlar gösteren hassas noktalar olarak belirlenirken, kuzey doğu Amerika ve Kuzey Kutbu'nun farklı küresel ısınma seviyeleri altında kuraklık şiddetinde önemli bir azalma görülmektedir. Ayrıca, küresel ısınmanın kuraklıkların zamanlamasını değiştireceği ve özellikle Avrupa'da daha sık yaz kuraklıklarına yol açacağı tahmin edilmektedir.

Zhou ve ark. (2023), küresel anlamda 2021-2100 yılları arası meteorolojik kuraklık riskini, CMIP6 kapsamındaki GCM'ler tarafından kullanıma sunulan dört farklı senaryo (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 ve SSP5-8.5) çıktılarını kullanarak değerlendirmişlerdir. Çalışma, Güney Asya, Akdeniz, Doğu Asya, Güneydoğu Asya ve Orta Amerika bölgelerinde kuraklık riskinde büyük artışlar gözlemlenmiştir.

## 2.2. Afrika Kıtası

Haile ve ark. (2020), CMIP5 kapsamındaki beş GCM'den oluşan bir topluluğun RCP2.6, 4.5 ve 8.5 senaryolarına ait çıktıları kullanarak Doğu Afrika bölgesindeki kuraklık değişimlerini, SPI ve SPEI indekslerine göre yakın gelecek (2011–2040), yüzyıl ortası (2041–2070) ve yüzyılın sonu (2071-2100) için değerlendirmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, Doğu Afrika'daki kuraklığın meydana geldiği alanlarının

21. yüzyılın sonunda RCP2.6, 4.5 ve 8.5 senaryolarına göre sırasıyla %16, %36 ve %54 oranında artması beklenmektedir.

Ajayi ve Ilori (2020), batı Afrika bölgesinde kuraklıkların sınıflandırması, mevsimsel ve yıllık değişkenlik eğilimleri, RCP2-4.5 ve RCP5-8.5 senaryoları ile edilen projeksiyon verileri ışığında, SPI ve SPEI, Mann-Kendall eğilim testleri ile incelemiştir. Çalışmada, 2011-2060 yılları arasında nemli bir dönem ve 2060'lardan yüzyılın sonuna doğru hem RCP4.5 hem de RCP 8.5'e senaryolarına göre daha kurak bir dönem öngörüsü yapılmıştır. İki endeks tarafından öngörülen kuraklık olayları, Batı Afrika'nın 12° kuzey enlemlerinin kuzeyindeki bölgelerin hafif ve orta derecede kuraklıklar için sıcak noktaları olacağını, Batı Afrika'nın güney kesiminin ise her iki RCP senaryosuna göre belirgin bir şekilde şiddetli ve aşırı kuraklıklara tanık olacağını göstermektedir.

Nashwan ve Shahid (2020), Mısır bölgesi için CMIP6 kapsamında yayınlanan 29 farklı GCM arasından en iyi tahmin yeteneğine sahip GCM'ler belirlenerek MME oluşturmuşlardır. Çalışmada, 1.5 ve 2.0 °C ısınma seviyelerini temsil eden SSP1-1.9 ve SSP1-2.6 senaryolarına göre bu tahminler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, Mısır'ın kuzeyindeki yüksek yağış bölgesinde, SSP1-1.9 ve SSP1-2.6 senaryoları altında yağışlarda sırasıyla %37 ve %54 oranında bir artış olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, güneybatıdaki düşük yağış bölgesinde her iki senaryo altında yaklaşık %35 oranında bir azalma öngörülmektedir. Bu artış çoğunlukla kış mevsiminde meydana gelmesi, yaz mevsiminde ise neredeyse hiçbir değişiklik beklenmemektedir. Ayrıca, yağış aşırılıkları üzerine yapılan projeksiyonlar, kuzey kıyı bölgesindeki aşırı yağış miktarında %0 ile %14 arasında bir artışın olabileceğini öngörmektedir.

Almazroui ve ark. (2020b), CMIP6 kapsamında yayınlanan 27 GCM'nin SSP1-2.6, SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryo çıktıları kullanılarak oluşturulan MME ile yirmi birinci yüzyılda Afrika'da öngörülen sıcaklık ve yağış değişimleri incelenmiştir. Çalışmadaki bulgulara göre, yirmi birinci yüzyıl boyunca Afrika'nın tümünü kapsayan sekiz alt bölgesinde yıllık sıcaklıkta sürekli bir artış öngörülmüştür. Yakın ve uzun dönemler için, Afrika'daki ortalama yıllık sıcaklığın, SSP1-2.6, SSP2-4.5 ve SSP5-8.5

senaryolarına göre sırasıyla 1.2 °C (1.4 °C), 1.5 °C (2.3 °C) ve 1.8 °C (4.4 °C) artacağı tahmin edilmektedir. Yirmi birinci yüzyılın sonunda, SSP5-8.5 senaryosuna göre yıllık ortalama sıcaklıktaki en büyük artışın (5.6 °C) Sahra'da, en küçük artışın (3.5 °C) ise Orta Doğu Afrika'da görüleceği tahmin edilmektedir. Öte yandan, yirmi birinci yüzyılda Afrika'daki yağış projeksiyonları, büyük mekânsal değişkenlik ve mevsimsel farklılıklar göstermektedir. Afrika'nın kuzey ve güney kesimlerinde yağış miktarında azalma, orta kesimlerinde ise üç referans senaryo altında gelecekte bir artış öngörülmektedir. Yakın ve uzun dönemler için, Afrika'daki ortalama yağış miktarının SSP1-2.6, SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryoları altında sırasıyla %6.2 (4.8), %6.8 (8.5) ve %9.5 (15.2) artması beklenmektedir.

Babaousmail ve ark. (2022), Afrika kıtasının kuzey kesimi ve Akdeniz havzasını kapsayan çalışma alanında, ortalama ve aşırı yağışlardaki öngörülen değişimler, CMIP6 kapsamında yayınlanan GCM'lerden oluşan MME modeli ile yapılan projeksiyonlara dayanarak değerlendirilmiştir. Bu projeksiyonlar, 21. yüzyılın sonuna kadar bölgenin çoğu bölümünde ortalama yağışta bir azalma olacağını göstermektedir. Fas ve Cezayir'in en yüksek kuraklaşma riskine sahip bölgeler olduğu öngörülmektedir.

Gumus ve ark. (2023), kuzeybatı Afrika'nın önemli bir bölgesi olan Fas için, CMIP6 kapsamında 15 GCM kullanarak aylık ortalama günlük toplam yağış ve aylık ortalama maksimum ve minimum sıcaklıkların projeksiyonlarını yapmışlardır. Çalışmada, YSA tabanlı istatistiksel ölçek indirgeme yöntemiyle tarihsel (1980-2021), yakın gelecek (2025-2049), orta gelecek (2050-2074) ve uzak gelecek (2075-2100) dönemleri için ayrı ayrı analiz edilmiştir. Her iki senaryo (SSP2-4.5 ve SSP5-8.5) altında Fas'ta minimum ve maksimum sıcaklıklarda önemli artışlar beklenmektedir. Öyle ki, yüzyılın sonuna kadar bazı bölgelerde bu artışın 5 °C'ye kadar çıkabileceği öngörülmektedir. Çalışma, Fas'ta SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryoları altında toplam yağış miktarında sırasıyla yaklaşık %30 ve %50'lik bir azalma yaşanabileceğini belirtmektedir. Bölgenin bu veriler doğrultusunda yüzyılın sonuna kadar önemli bir kuraklıklarla karşılaşabileceği belirtilmiştir.

### 2.3. Asya Kıtası

Zhai ve ark. (2020), CMIP6 kapsamında yayınlanan GCM'lerin SSP (SSP1–2.6, SSP2–4.5 ve SSP5–8.5) senaryo çıktılarını kullanılarak Güney Asya'daki (Afganistan, Bangladeş, Butan, Hindistan, Maldivler, Nepal, Pakistan ve Sri-Lanka) bölgelerin gelecekteki kuraklık özelliklerini incelemiştir. Bu çalışma, beş modellenmiş bir topluluk ortalaması seçerek, 2020–2099 dönemi için SPEI'nin 12 aylık zaman ölçeği (SPEI12) ve Kendinden Kalibreli Palmer Kuraklık İndeksi (A Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index sc-PDSI) kuraklık indeksleri kullanarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonuçları, kuraklık koşullarındaki önemli artışların özellikle Kuzey-Batı alt bölgesinde belirgin olduğunu göstermektedir. Ortalama kuraklık süresinde ve kuraklık sıklığında güçlü artışlar öngörülmüştür. Kuzey-Batı alt bölgesi, daha uzun süreli ve daha yoğun kuraklık olaylarıyla karşı karşıya kalma konusunda en savunmasız bölge olarak tespit edilmiştir. Güney batı, Kuzey bölgelerin orta ve batı alt bölgelerinin bazı kısımlarının da gelecekte daha olumsuz kuraklık koşullarıyla karşı karşıya kalacağı belirtilmiştir.

Almazroui ve ark. (2020a), CMIP6 kapsamında yer alan 31 GCM'ye ait üç farklı SSP senaryoyu kullanarak 21. yüzyıl boyunca Arap Yarımadasında öngörülen sıcaklık ve yağış değişimlerini analiz etmişlerdir. Bu çalışmada, yıllık sıcaklığın her on yılda 0,63 °C oranında arttığı, buna karşılık yıllık yağışların her on yılda 6,3 mm azaldığı gözlemlenmiştir. Yaz mevsiminde, kış mevsimine göre daha yüksek sıcaklık artışlarının görüleceği belirtilmiştir. Çalışmada 21. yüzyılın sonunda Kuzey Arap Yarımadası'nın (NAP), Güney Arap Yarımadası'ndan (SAP) daha fazla ısınacağı tahmin edilmektedir. Yakın (2030-2059) ve uzak (2070-2099) gelecek dönemleri için yapılan tahminler, yıllık ortalama sıcaklık artışının SSP1-2.6, SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryoları altında sırasıyla 1.2-1.9 (1.2-2.1) °C, 1.4-2.1 (2.3-3.4) °C ve 1.8-2.7 (4.1-5.8) °C aralıklarında olacağını göstermektedir. Yağışlarla ilgili olarak, Güney Arap Yarımadası üzerinde yıllık ortalama yağışlarda güçlü bir artış, Kuzey Arap Yarımadası'nda ise bir azalma beklenmektedir. Arap Yarımadası'nın tamamında, yıllık ortalama yağış oranlarının yakın (uzak) gelecekte SSP1-2.6, SSP2-4.5 ve SSP5-8.5

altında sırasıyla %5 ila 28 (-3 ila 29), %5 ila 31 (4 ila 49) ve %1 ila 38 (12 ila 107) oranlarında değişeceği öngörülmektedir.

Guo ve ark. (2021), Orta Asya'da CMIP6 kapsamında yayınlanan GCM topluluğu ile yapılan projeksiyon verileri ışığında, SPEI kuraklık indeksi kullanılarak 2100 yılına kadar kuraklığın karakterizasyonu (frekans, şiddet ve süre) değerlendirmişlerdir. Araştırma sonuçları, Orta Asya'da yağış ve buharlaşmanın artacağını tahmin edilmektedir. Çalışmada, 21. yüzyılın sonlarına doğru, Orta Asya'nın yarı kurak ve kurak bölgelerinde (kuraklık indeksi  $<0,5$ ) kuraklık olaylarının daha sık (%125'ten fazla), daha uzun süreli (%55'ten fazla), daha şiddetli (%74'ten fazla) ve daha yoğun (%8'den fazla) olacağı öngörülmektedir.

Supharatid ve Nafung (2021), Güneydoğu Asya'da (Kamboçya, Laos, Myanmar, Vietnam ve Tayland, Malezya, Singapur, Endonezya ve Filipinler Brunei ve Doğu Timur), CMIP6 kapsamında yayınlanan modellere ait SSP (SSP2-4.5 ve SSP5-8.5) senaryo çıktıları kullanılarak elde edilen projeksiyon verileri ile 12 aylık zaman ölçeğinde (SPEI12) hesaplanan kuraklıkları, zamansal ve mekânsal olarak değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonuçlarına göre, yakın gelecek dönemde tüm bölgelerde orta ila şiddetli kurak koşullar gözlemlenirken, orta gelecek dönemden uzak gelecek dönemlere kadar nemli bir iklim durumu öngörülmüştür. Öngörülen kuraklık özelliklerinin, SSP5-8.5 senaryosuna göre nispeten daha uzun sürelerde, daha yüksek yoğunluklarda ve daha fazla şiddette olacağı öngörülmüşken, kuraklık sayılarında ise en yüksek SSP2-4.5 senaryosunda meydana geleceği belirtilmiştir.

Song ve ark. (2021), Çin anakarasında, CMIP6 kapsamındaki 9 GCM modeline ait SSP (SSP1-2.6, SSP2-4.5 ve SSP5-8.5) senaryolarına ait çıktılar kullanılarak, bölgedeki kuraklığın SPI indeksinin 3 aylık zaman serisine (SPI3) göre mekânsal-zamansal değişimlerini incelenmişlerdir. Çalışmanın sonuçları, kuraklık olaylarının hem tarihi hem de gelecek dönemlerde Haziran-Eylül aylarında diğer aylara kıyasla daha sık meydana geldiğini belirtilmiştir. Tarihsel döneme kıyasla, gelecekteki projeksiyon verileri ışığında, kuraklık merkezlerinin güneye doğru kayarak, güney Çin'de nispeten yüksek bir kuraklık sıklığına işaret ettiği belirlenmiştir. Ek olarak,

kuraklık olaylarının daha kısa sürelerde, daha küçük etkilenen alanlarda meydana geleceği, ancak her üç senaryoda da daha yüksek yoğunluğa sahip olacağı tahmin edilmiştir.

Sharma ve ark. (2021), Himalaya dağ sırasını da içine alan Nepal bölgesinde, CMIP6 kapsamındaki 13 GCM'ye ait üç farklı SSP (SSP1-2.6, SSP2-4.5 ve SSP5-8.5) senaryo çıktılarını kullanarak, gelecekteki kuraklık koşullarını SPEI kuraklık indeksine göre değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonuçları, SSP1-2.6 ve SSP2-4.5'e kıyasla SSP5-8.5 kapsamında erken gelecekte daha uzun ve şiddetli kuraklıkların meydana geleceğine belirtilmiştir.

Chen ve ark. (2021), CMIP6 kapsamında kullanıma sunulan 20 GCM'nin dört SSP (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 ve SSP5-8.5) senaryosu çıktılarına göre yaptıkları projeksiyon verileri ile Çin bölgesinin kuraklık koşullarını ve sosyoekonomik etkilerini sc-PDSI kuraklık indeksi temelinde değerlendirmişlerdir. Sonuçlara göre, SSP1-2.6 senaryosuna göre 2020-2099 yılları arasında kurak bölgeler dışında Çin'in geniş bir bölgesinde ılımanlaşma eğilimleri gözlemlenmiştir. Ancak, SSP2-4.5, SSP3-7.0 ve SSP5-8.5 altında nemli ve ılıman bölgelerde önemli kuraklaşma eğilimleri tespit edilmektedir. Öngörülen kuraklık koşullarının, özellikle SSP3-7.0 ve SSP5-8.5 altındaki bu nemli ve ılıman yarı nemli bölgelerde, daha sık ve daha yüksek aşırı kuruma koşulları olasılığı ile şiddetli olması öngörülmüştür.

Tomaszkiewicz (2021), RCM çıktılarını kullanarak SPI3 kuraklık indeksi ile Ortadoğu bölgesinde gelecekteki mevsimsel kuraklık durumunu incelemiştir. Çalışma sonuçlarında, özellikle kış aylarında Sahra'nın doğusundaki Rift Vadisi'nde daha az sıklıkta ve şiddette kuraklığın beklendiğini belirtilmiştir. Buna karşılık, Fas Yaylaları ve bitişindeki Akdeniz kıyıları, kış ve ilkbahar mevsimlerinde yüzyılın sonuna kadar kuraklıkta dikkat çekici bir artış olacağına işaret etmektedir.

Salehie ve ark. (2022a), Orta Asya'da kuraklık durumunu, CMIP6 kapsamında yayımlanan GCM'lere ait SSP (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 ve SSP5-8.5) senaryo çıktıları kullanılarak, SPEI indeksinin 3, 6 ve 12 aylık zaman serilerine göre

değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonuçları, farklı SSP senaryoları için havzanın çoğu yerinde yağışta yakın gelecekte %3 ile %12 arasında ve uzak gelecekte %3 ile %9 arasında bir düşüş olduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte, yakın gelecekte PET değerlerinde neredeyse hiçbir değişiklik göstermezken, uzak gelecekte %10 ile %70 arasında bir artışın meydana geldiği belirtilmiştir. Tüm kuraklık şiddetlerindeki artışların çoğunlukla havzanın merkezi ve kuzeybatısında tespit edilmiştir.

Hamed ve ark. (2022), CMIP6 kapsamındaki 21 GCM'ye ait çıktıları kullanarak, istatistiksel ölçek indirgeme yöntemi ile Irak bölgesinin yağış ve sıcaklık projeksiyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Bu projeksiyonlara dayanarak, Irak'taki kuraklık olaylarının mekânsal ve zamansal değişkenliği, SPEI kuraklık indeksi kullanılarak yakın gelecek (2020-2059) ve uzak gelecek (2060-2099) için incelenmiştir. Sonuçlara göre SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryoları altında, yakın gelecekte daha büyük bir düşüş ve uzak gelecekte bir artış beklenmektedir. Her iki senaryoda da tüm şiddet seviyeleri için kuraklık sıklığının yakın gelecekte %0 ile %40 arasında azalacağı, uzak gelecekte ise orta ve şiddetli kuraklıkların %45'e kadar artacağı tahmin edilmektedir. Çalışmada, özellikle kuzey bölgelerinde aşırı kuraklıklarda %30'lara varan düşüşler tespit edilmiştir.

Behzadi ve ark. (2022), İran'da 2021'den 2050'ye kadar iklim değişikliğinin yağış ve sıcaklık üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu kapsamda, GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES ve IPSL-CM5A-LR GCM'lerine ait RCP2.6 ve RCP8.5 senaryo çıktıları kullanılmıştır. Kış aylarında, GFDL-ESM2M modelinin RCP2.6 senaryosu altında ortalama yağışta en yüksek 23 mm'lik bir artış tespit edilmiştir. Buna karşılık, sonbaharda ortalama yağışta en yüksek 10,5 mm'lik bir düşüş gözlemlenmiştir. HadGEM2-ES modelinin RCP8.5 senaryosunda ise ortalama sıcaklıkta en yüksek artış 3,1 °C olup, mevsimsel olarak yaz aylarında 8,5 °C'ye varan sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. SPI kuraklık indeksi kullanılarak yapılan kuraklık değerlendirmesinde, gelecekteki 30 yıllık dönemin yaklaşık %70'inin kurak yıllar olacağı ve 2030'dan 2040'a kadar İran'ın tüm havzalarında hemen hemen tüm senaryolar altında kuraklık meydana geleceği belirtilmiştir.

Farhat ve ark. (2022), Afganistan'da sıcaklık ve yağışın gelecekteki mekânsal ve zamansal projeksiyonlarını, CMIP6 kapsamındaki üç farklı GCM (CNRM-CM6-1, EC-Earth3-CC, MRI-ESM2-0) çıktılarını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmadaki analiz sonuçları, 21. yüzyılın ortasında (2030-2059) ve sonunda (2070-2099), SSP2-4.5 senaryosu altında ortalama günlük yağış miktarının sırasıyla %3 ve %8, SSP5-8.5 senaryosu altında ise %4 ve %15 oranında artacağını göstermiştir. Ayrıca, yüzyılın ortasında ve sonunda ortalama günlük sıcaklık artışlarının SSP2-4.5 senaryosu altında sırasıyla %13 ve %22, SSP5-8.5 senaryosu altında ise %17 ve %41 seviyelerinde olacağı öngörülmektedir.

Mathbout ve ark. (2023), Suriye'deki kuraklık karakteristiklerini, CMIP6 veri kümesinden alınan 13 GCM'ye ait SSP (SSP1-2.6 ve SSP5-8.5) senaryo çıktıları ile değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonuçları, en iyimser senaryolar altında bile bu bölgelerde artan kuraklık şiddeti, sıklığı ve süresine işaret etmektedir. Ayrıca, daha yüksek emisyon senaryolarının daha uzun süreli ve yoğun kuraklık olaylarıyla ilişkili olduğu ve bu durumun potansiyel olarak daha az savunmasız olan alanları bile etkileyebileceği vurgulanmaktadır.

#### 2.4. Amerika ve Avustralya Kıtaları

Penalba ve Rivera (2013), Güneydoğu Amerika'da 2011-2100 yılları arası kuraklık karakterizasyonunu, CMIP5 kapsamında yayınlanan 15 GCM'den oluşturulan MME ile SPI kuraklık indeksinin 3 ve 12 aylık zaman serilerine göre değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonuçları, orta ve yüksek emisyon senaryoları altında yapılan geleceğe yönelik iklim projeksiyonlarının, 21. yüzyılda kısa ve uzun vadeli kuraklıkların daha sık meydana geleceğini ve çalışma alanının büyük bir bölümünde bu kuraklıkların daha kısa süreli ve daha şiddetli olacağını ortaya koymuştur.

Kirono ve ark. (2020), CMIP5 kapsamında sunulan GCM verileri ile yapılan projeksiyon verileri temelinde, SPI ve Standart Toprak Nem İndeksi (Standardized Soil Moisture Index-SSMI) kuraklık indekslerine göre Avustralya'da kuraklıkların

zamansal ve mekânsal değerlendirmelerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın sonuçları, iklim değişikliğinin neden olduğu daha şiddetli kuraklık tehlikesinin, daha önce belirtilenden daha geniş bir alanda, özellikle güney ve doğu Avustralya'da belirgin bir şekilde görüldüğünü ortaya koymaktadır.

Bustos Usta ve ark. (2021), yirmi birinci yüzyılda Güney Amerika'daki sıcaklık değişimlerini, CMIP6 kapsamında yayınlanan 22 GCM'den oluşturulan MME'ye ait üç SSP (SSP1-2.6, SSP2-4.5 ve SSP5-8.5) senaryo çıktıları ile yaptıkları projeksiyonlara göre değerlendirmişlerdir. Çalışma sonuçları, Güney Amerika'nın Kolombiya, Brezilya, Venezuela, Guyana-Surinam-Fransız Guyanası, Peru, Bolivya ve Paraguay gibi bölgelerinin, seçilen SSP senaryosuna bakılmaksızın sıcaklık artışından dolayı iklim değişikliği etkilerine karşı oldukça savunmasız olduğunu göstermektedir. Yirmi birinci yüzyılın sonuna doğru Güney Amerika'da yıllık ortalama sıcaklığın, SSP1-2.6, SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 projeksiyon senaryoları altında sırasıyla 0.92-2.11 °C, 0.97-3.37 °C ve 1.27-6.14 °C arasında artacağı tahmin edilmektedir.

Almazroui ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada, CMIP6 kapsamındaki 31 GCM'nin üç SSP (SSP1-2.6, SSP2-4.5 ve SSP5-8.5) senaryosu çıktıları kullanılarak Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Orta Amerika ve Karayipler'deki sıcaklık ve yağış değişiklikleri, 2021–2040, 2041–2060 ve 2080–2099 dönemleri için incelenmiştir. Çalışmada, sıcaklık artışının üç SSP senaryosu genel olarak tüm alanda altında meydana geleceği, özellikle SSP5-8.5 altında 6 °C'ye kadar çıkabileceği belirtilmiştir. Buna ek olarak, ABD'nin çoğu bölgesinde yağışların %10-30 oranında artarken, Orta Amerika'da %10-40 oranında azalacağı öngörülmüştür. Mevsimsel değişimler kapsamında, ABD'nin doğu ve orta alt bölgelerinde kış ve ilkbaharda yağış artışı, yaz ve sonbaharda ise azalış beklenirken, muson bölgesi ve Orta Amerika'da sonbahar dışındaki tüm mevsimlerde yağış azalması beklenmektedir.

## 2.5. Avrupa Kıtası ve Akdeniz Havzası

Spinoni ve ark. (2018), Avrupa kıtası genelinde, 11 CORDEX iklim modelinin çıktılarını kullanarak, SPI, SPEI ve RDI kuraklık indekslerinin 3 ve 12 aylık zaman ölçekleri ile kuraklık karakterizasyonunu 1981'den 2100'e kadar değerlendirmişlerdir. Çalışmada, her bir simülasyon için 1981-2010, 2041-2070 ve 2071-2100 yılları arasındaki aşırı kuraklık olaylarının sıklığı ve şiddeti analiz edilmiştir. Orta emisyon senaryosu (RCP4.5) altında, Akdeniz bölgesinde ve batı Avrupa'da kuraklıkların giderek daha sık ve şiddetli hale geleceği tahmin edilmektedir. Kuzey İskandinavya ve İzlanda hariç, tüm Avrupa kıtası en şiddetli emisyon senaryosu olan RCP8.5 altında, özellikle 2070'ten sonra daha sık ve şiddetli aşırı kuraklıklardan etkilenecektir. Mevsimsel olarak, her iki senaryo altında Avrupa'nın her bölgesinde ilkbahar ve yaz aylarında kuraklık sıklığının, özellikle güney Avrupa'da artacağı tahmin edilmektedir; buna karşın kış mevsiminde, kuzey Avrupa'da kuraklık sıklığında bir azalma beklenmektedir.

Coppola ve ark. (2021a), CORDEX kapsamında yayınlanan RCM, CMIP5 ve CMIP6 kapsamındaki GCM'lere ait RCP1-2.6 ve RCP5-8.5 senaryo çıktıları ile Avrupa kıtası ve Akdeniz havzasında iklimsel birçok parametrenin (ortalama yağış, ortalama sıcaklık, ekstrem yağış ve sıcaklık, kuraklık) değişimlerinin projeksiyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Araştırmanın sonuçlarına göre, kış aylarında Kuzey Avrupa'daki tüm model topluluklarında maksimum ısınma ve maksimum yağış artışı öngörülmektedir. Yaz aylarında ise maksimum ısınma, özellikle Akdeniz ve Güney Avrupa bölgelerinde gözlemlenmiştir Akdeniz bölgesinde aşırı yağışların ve kuraklık sıklığının artacağına dair model toplulukları arasında yüksek düzeyde fikir birliği bulunmaktadır.

Palmer ve ark. (2021), Avrupa Kıtası'nın sıcaklık ve yağış projeksiyonlarını CMIP5 ve CMIP6 kapsamında yayınlanan GCM'lerin çıktılarına dayanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın sonuçları, CMIP6 topluluğunun, CMIP5'e kıyasla özellikle orta Avrupa ve Akdeniz'de yaz aylarındaki ısınmanın arttığını istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde gösterdiğini ortaya koymuştur. CMIP6 modelinde, Orta

Avrupa'nın yağış tahminleri yaz aylarında daha güçlü bir kuruma eğilimine işaret ederken, ayrıca daha dar bir projeksiyon aralığı olduğu belirlenmiştir. Mekânsal karşılaştırmalarda, bu kuruma eğiliminin kuzey Avrupa'ya da yayıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, kuzey Avrupa ve Akdeniz'de öngörülen daha sıcak yaz sıcaklıklarının, CMIP6 modellerindeki daha yüksek küresel iklim duyarlılıklarından kaynaklandığı belirtilmiştir.

Cos ve ark. (2022), Akdeniz bölgesinde gelecekte olası sıcaklık ve yağış değişimlerini, CMIP5 ve CMIP6 çok modellenli topluluklarını kullanarak analiz etmişlerdir. Çalışmanın sonuçları, 21. yüzyılda Akdeniz'deki ısınmanın, özellikle yaz aylarında, küresel ortalamaya göre daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Yaz mevsimindeki ısınma, CMIP6 modelinde üç farklı senaryoya göre 1.83 ila 8.49 °C, CMIP5 modelinde ise 1.22 ila 6.63 °C arasında değişebileceği belirtilmiştir. Sıcaklık projeksiyonlarının aksine, yağış değişiklikleri daha fazla belirsizlik ve mekânsal heterojenlik göstermektedir. Bununla birlikte, yüzyılın sonuna kadar yaz aylarında Akdeniz bölgesinin büyük kısmında, özellikle yüksek emisyon senaryolarında (CMIP6'da % -49 ila % -16 ve CMIP5'te % -47 ila % -22 arasında) önemli bir yağış düşüşü öngörülmektedir.

Carvalho ve ark. (2022), EURO-CORDEX kapsamında yayınlanan RCM'lere ait RCP4.5 ve RCP8.5 senaryo çıktıları ile Akdeniz havzasında gelecekteki çoraklaşma durumunu incelemişlerdir. Araştırmanın sonuçları, yüzyılın sonlarına doğru (2081-2100) RCP8.5 senaryosuna göre, güney İber Yarımadası ve kuzeybatı Afrika'da yağış ve evapotranspirasyonun yaklaşık %30-40 oranında azalacağını öngörmektedir. Alpler, Pireneler ve Atlas Dağları'nda ise RCP8.5 senaryosuna göre %50'ye varan azalmalar meydana gelebilecektir. Bu yağış ve potansiyel evapotranspirasyon değişikliklerinin Akdeniz bölgesinde, özellikle Kuzey Afrika ve İber Yarımadası'nda güçlü, önemli ve belirgin bir kuraklık artışına yol açması beklenmektedir.

Essa ve ark. (2023), Akdeniz havzasının 2021 ile 2060 yılları arası meteorolojik, tarımsal ve hidrolojik kuraklıklarının değişimini, dört farklı SSP (SSP1-2.6, SSP2-

4.5, SSP3–7.0 ve SSP5–8.5) senaryo çıktıları ile yapılan projeksiyon verileri ışığında SPEI indeksi kullanarak yapmışlardır. Projeksiyon sonuçlarında, incelenen dönem (2021-2060) için kuraklık frekanslarının %12 ila %25 arasında artışların olduğunu belirtilmiştir. Bu değişim bölgelere ve iklim senaryolarına göre farklılık gösteriyor. Özellikle, güneydeki Akdeniz ülkelerinde kuzey bölgelere göre kuraklık sıklığının daha belirgin bir şekilde arttığı gözlemleniyor. Ayrıca, kuraklık mevsimselliği üzerine yapılan analizler, meteorolojik (tarımsal) kuraklıkların yaz (veya sonbahar) aylarında daha sık görüldüğünü ortaya koymaktadır.

## 2.6. Türkiye

Danandeh Mehr ve ark. (2019), Türkiye'nin Ankara ilinde üç RCM'ye ait çıktıları kullanarak, gelecek yağış ve sıcaklık projeksiyonlarını, dinamik ölçek indirgeme yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir. Bu projeksiyon verilerine dayanarak SPI ve SPEI kuraklık indekslerinin 3, 6 ve 12 aylık zaman ölçeklerinde 1971-2000 tarihi ve 2016-2040 gelecek dönemler için kuraklıklar değerlendirilmiştir. Projeksiyon sonuçlarına göre, aşırı kuraklık olayları olmaksızın daha az kuraklık olaylarının olacağı öngörülmüştür. Ayrıca, RCP4.5 senaryosu yakın gelecekteki dönemin ikinci yarısında kuraklık olaylarının baskın olacağını gösterirken, RCP8.5 senaryosu, kuraklık olaylarının yakın gelecekteki dönemin tamamında eşit olarak dağılacığını belirtmektedir.

Nuri Balov ve Altunkaynak (2020), Türkiye'nin Batı Karadeniz, Fırat ve Dicle Havzalarının 2040-2099 yılları arası yağış ve sıcaklık projeksiyonlarını, dinamik ölçek indirgeme metodu ile gerçekleştirmişlerdir. Bu projeksiyon verileri temelinde, SPI, Çin-Z ve İstatistiksel Z skor kuraklık indeksleri kullanılarak kuraklık değerlendirmeleri yapılmıştır. Ayrıca, kuraklık indekslerinin trend eğimleri Mann-Kendall yöntemiyle analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, tüm GCM'lerin çıktılarından hesaplanan kuraklık endeksleri değerlerine dayanarak, mevcut yüzyılda kuraklık süresinin ve yoğunluğunun artacağını göstermiştir.

Bağçacı ve ark. (2021), CMIP5 ve CMIP6 kapsamında yayınlanan GCM'lerin Türkiye'deki gözlenmiş tarihi yağış ve sıcaklıklarının simülasyon becerilerini irdelenmişlerdir. Ayrıca çalışma kapsamında, CMIP6 kapsamındaki GCM'lerin ortalamalarına dayanarak SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryolarının çıktılarını dayanarak kısa (2030-2050), orta (2050-2070) ve uzun (2070-2100) vadeli gelecek dönem için yağış ve sıcaklık değişimleri zamansal ve mekânsal olarak değerlendirilmiştir. Araştırmanın bulguları, CMIP6 modellerinin CMIP5'e göre daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Yaz mevsiminin sonbahara doğru giderek ısınması (6.5 °C'ye kadar) öngörülürken, yağışlarda meydana azalmaya bağlı olarak daha kuru (%40'a kadar azalma) bir iklim durumunun Türkiye genelinde yaygın bir durum olarak belirlenmiştir. Ayrıca, özellikle Karadeniz Bölgesi'nin doğusunda ve Anadolu'nun kuzeydoğusunda kış ve ilkbahar aylarında artan yağış miktarlarının bölgedeki taşkın risklerini artırabileceği belirtilmiştir.

Yeşilköy ve Şaylan (2022), Kuzeybatı Anadolu bölgesinin 1971 ile 2018 yılları arası aylık meteorolojik kuraklık analizlerini, SPEI ve sc-PDSI kuraklık indekslerini kullanarak değerlendirmişlerdir. Ayrıca, 2019-2050 ve 2051-2099 dönemleri için, CORDEX kapsamında yayınlanan beş GCM'den oluşturulan MME ait RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryo verileri temel alınarak bölgenin öngörülen kuraklık olayları analiz edilmiştir. Bölgede SPEI ve sc-PDSI ile belirlenen orta ve yüksek kuraklık oranları sırasıyla %17.2 ve %30.3 olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, 2051-2099 yılları arasında RCP 4.5 senaryosunda kuraklık oluşum oranının %38.3 ile %35.3, RCP 8.5 senaryosunda ise %47 ile %41 arasında artacağı öngörülmektedir.

Mesta ve ark. (2022), Türkiye'nin Akdeniz bölgesinde gelecekteki yağışın mekânsal değişimini, yakın (2020-2030), orta (2031-2050) ve uzak (2051-2100) gelecek zaman dilimleri için 12 CORDEX RCM'si ve iki GCM modelinin çıktılarını kullanarak değerlendirmişlerdir. Yapılan değerlendirmeler neticesinde RCP4.5 senaryosuna göre ortalama yağışta öngörülen değişim yakın, orta, uzak gelecekte sırasıyla; %-0.5, %-2.7, %-7'dir. En kötümser senaryo RCP8.5'e göre ise yıllık yağıştaki değişim sırasıyla %1.3, %-4.6 ve %-14'tür. Bununla birlikte, yüzyılın ikinci yarısı için, RCP8.5 için RCP 4.5 senaryosundan daha büyük bir azalma öngörülmüştür.

Yılmaz ve ark. (2022), Türkiye'nin Çoruh Nehir havzasında CORDEX kapsamında yayınlanan 13 RCM'nin RCP2-4.5 ve RCP5-8.5 senaryo çıktılarını kullanarak, yağış, maksimum ve minimum sıcaklıkların projeksiyonunu yapmışlardır. Bu projeksiyon verilerine dayanarak, SPI kuraklık indeksi ile 2030-2059 ve 2070-2099 yılları arası meteorolojik ve hidrolojik kuraklıkların değişimi değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, gelecekteki yıllık yağışlarda %15.46'ya kadar azalma, maksimum sıcaklıklarda ise 8.74 °C'ye kadar artış, minimum sıcaklıklarda da -2.69 °C'den 5,27 °C'ye kadar bir değişim öngörülmektedir.

Yavaşlı ve Erhat (2023), Türkiye'nin yedi coğrafi bölgesinde iklim değişikliğinin çoraklık üzerindeki potansiyel etkilerini ele almışlardır. Çalışmada, 2011-2040, 2041-2070 ve 2071-2100 olmak üzere üç farklı zaman dilimi ve üç farklı SSP (SSP1-2.6, SSP3-7.0, SSP5-8.5) senaryoları incelenmiştir. Araştırmada, Pinna Birleşimli İndeksi (PCI), Erinç Çoraklık İndeksi (EAI) ve UNEP Çoraklık İndeksi (UNEP AI) olmak üzere üç farklı çoraklık indeksi ile değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, her üç endeksin de 2041 yılından sonra Türkiye'deki kuru iklim koşullarında bir artışa işaret ettiğini ortaya koymuştur. Özellikle Orta Anadolu, Güneydoğu Anadolu ve Doğu Akdeniz'in bazı kısımları yanı sıra, Doğu Anadolu'nun doğu kısımları ve İç Ege bölgesinde dikkate değer artışlar beklenmektedir. Ayrıca SSP3-7.0 senaryosuna göre, yarı kurak ve kurak alanların genişlemesi yüzyılın sonuna kadar Türkiye'nin yaklaşık %30'undan fazlasını kapsayacak şekilde öngörülmektedir.

Yukarıda küresel ve bölgesel ölçeklerde yapılan çalışmalar incelendiğinde, iklim değişikliğinin sıcaklık ve yağış üzerindeki etkilerinin ve bu etkiler neticesinde tüm ekosistemlerde hayati derecede önemli birçok iklimsel ve çevresel felakete neden olacağı belirtilmiştir. Birçok çalışmada da vurgulandığı gibi Akdeniz havzası iklim değişikliğinin sıcak noktası olması açısından kritik bir bölge konumundadır. Güney Doğu Akdeniz havzasında yer alan Türkiye'nin Akdeniz bölgesi tarım, turizm, deniz ticareti, su kaynakları ve biyoçeşitlilik açısından önemli bir yere sahiptir. Bu bağlamda, bölge için yapılacak iklim değişikliği projeksiyonları ve bu projeksiyonlara

dayalı alınacak önlemlerin gelecek nesiller için sürdürülebilir bir dünya bırakma hedefi açısından oldukça önem arz etmektedir.

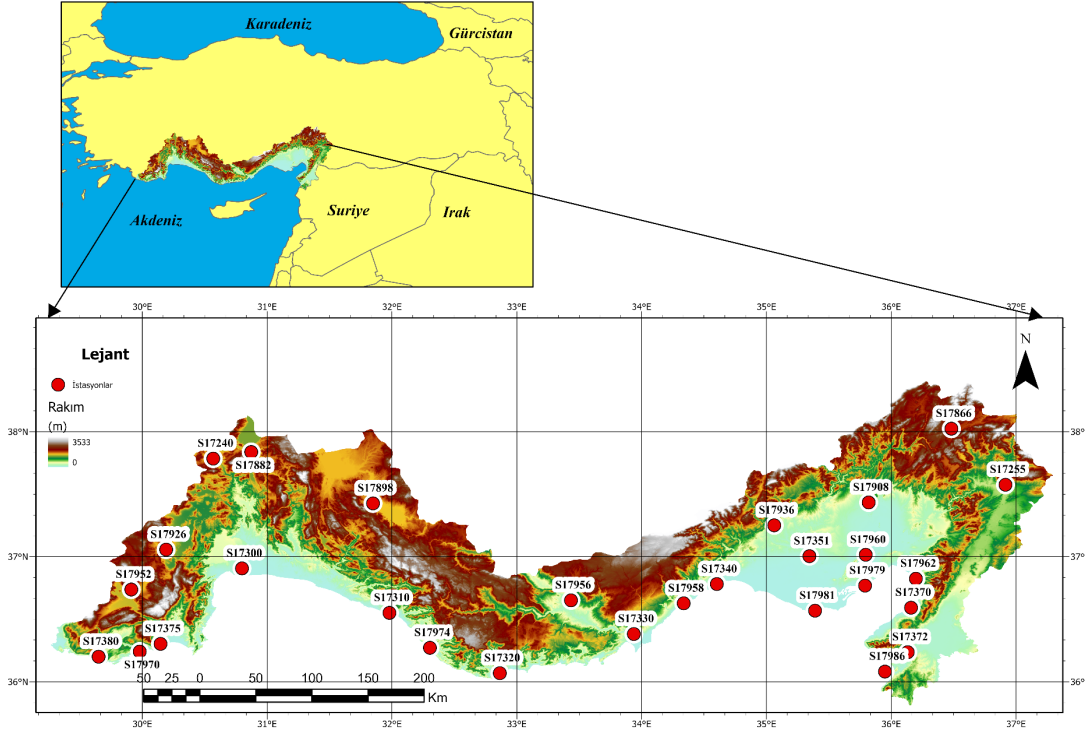
Bu tez, Akdeniz Bölgesi için istasyon bazlı gözlemlenmiş yağış ve sıcaklık verileri kullanılarak CMIP6'ya ait GCM'lerin istatistiksel ölçek indirgemesinde YSA yöntemi kullanan ilk çalışmadır. Ayrıca bölgede gözlenmiş verileri baz alarak ve CMIP6 veri setine ait GCM'leri kullanarak yapılmış bir kuraklık çalışması da bulunmamaktadır. Bu tez çalışmasıyla bölgenin iklim projeksiyonu ve kuraklıkları detaylı bir şekilde analiz edilerek bölge halkına ve karar vericilere bir kaynak oluşturulması hedeflenmiştir.



### **3. MATERYAL ve YÖNTEM**

#### **3.1. Çalışma Alanı**

Akdeniz havzası, karmaşık ve çeşitli topografik özellikleriyle bölgesel atmosferik dolaşımı ve yerel iklim şartlarını etkileyen bir coğrafi yapıya sahiptir. (Lionello ve ark., 2006). Bu coğrafyada pek çok körfez, yarımada ve ada bulunmaktadır. Akdeniz havzasının doğu kısmında yer alan ve coğrafi konumu ve topografik haritası Şekil 3.1. 'de verilen Akdeniz coğrafi bölgesi, Türkiye'nin en güneyinde yer alan yedi coğrafi bölgeden biridir. Akdeniz boyunca uzanan 120 ile 180 km arasında değişen genişliği, 1542 km uzunluğuyla ve yaklaşık 120.000 km<sup>2</sup>'lik alanı ile Türkiye yüzölçümünün %14'ünü kaplar. Bölgenin %80' ini Akdeniz boyunca kıyıya paralel uzanan Toros Dağları ve yüksek platolar oluşturur. Toros Dağları, bölgenin arazi topoğrafyasında en önemli etken olarak, bölgenin yer şekillerinin temel özelliklerini belirlemede kilit bir rol oynamaktadır. Ayrıca Toros dağlarının Akdeniz kıyısı boyunca uzanması denizel etkinin İç Anadolu bölgesine geçişinde bir bariyer görevi üstlenmiştir.



Şekil 3. 1. Çalışma alanı

Akdeniz bölgesinin genelinde hâkim iklim tipi, Köppen iklim sınıflandırmasının önemli bir iklim tipi olan Akdeniz iklimidir (Poyraz, 2018). Bu iklim tipi, kuzey ve güney yarım kürede  $30^{\circ}$  ve  $45^{\circ}$  enlemleri arasında kıtaların batı taraflarında görülür. Akdeniz ikliminin karakteristiğinde yazlar daha sıcak ve kurak, kışlar ise ılık ve yağışlı geçmektedir. Bölgede yağışlar genellikle güney ve güneybatıdan gelen hava kütlelerine bağlı olarak genellikle cephesel ve orografiktir. Akdeniz Havzası genel olarak, orta Avrupa'nın ılıman ve yağışlı iklimi ile Kuzey Afrika'nın kurak iklimi arasında bir geçiş bölgesinde yer alır ve havza, tropikal ve orta enlem süreçleri arasındaki etkileşimlerden etkilenir. Bu özellikler, bölgenin ikliminin, genel dolaşımdaki küçük değişikliklerle, örneğin subtropikal yüksek basınçlı hücrelerin konumundaki değişikliklerle önemli ölçüde değişmesine neden olur (Çetinkaya, 2020).

Çalışma bölgesinin büyük bir kısmında Akdeniz iklim tipi hâkim olmasına rağmen, rakıma ve denizel etkiye bağlı olarak iklim özellikleri oldukça önemli

farklılaşmalar gösterir. Bölgenin dağların denize bakan yamaçlarında hâkim iklim Akdeniz iklimi görülürken, dağların kuzeyindeki çukur alanlarda karasal etkilerin arttığı bir iklim tipi görülür. Bölgenin yıllık ortalama sıcaklık 18 °C civarındadır, bunun yanında en sıcak yaz aylarında sıcaklık ortalaması 28-30 °C arası olurken, kış aylarında ise ortalama 8-10 °C arasında olmaktadır.

### 3.2. Veri Setleri

#### 3.2.1. Gözlem verileri

Bu çalışma kapsamında, bölgedeki 28 meteorolojik gözlem istasyonunun coğrafi konumları Şekil 3.1.'de verilen lokasyon haritasında gösterilmiştir. Bölgedeki en az otuz yıllık kesintisiz veriye sahip meteorolojik gözlem istasyonları değerlendirmeye alınmış, bu kritere uymayan istasyonlar ise çalışma kapsamına dahil edilmemiştir. Çalışmada kullanılacak olan gözlem istasyonların ait 1979-2020 yılları arasında ölçülmüş uzun yıllar ortalama yağış ve sıcaklık değerleri ve lokasyon koordinatları Çizelge 3.1.'de verilmiştir. Gözlem istasyonlarına ait ölçülmüş aylık toplam yağış ve ortalama sıcaklık verileri Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığına bağlı Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından temin edilmiştir.

Bölgede sürekli ölçülmüş yağış ve sıcaklık verisi bulunan 28 meteorolojik istasyonun 19'u kıyı bölgesinde (rakım <200 m), 9'u ise dağlık bölgelerde (rakım >200 m) yer almaktadır. Çalışma alanı, istasyonun rakımı dikkate alınarak kıyı ve dağlık bölgelere ayrılmıştır. Yükseklik değerlerinin 200 m'nin altında olduğu istasyonlar, kıyı bölgesinde; üstündeki bölgeler ise dağlık bölge olarak kabul edilmiştir. Bölgedeki istasyon verilerine bakıldığında, kıyı bölgesinin dağlık bölgelere göre daha yüksek ortalama sıcaklıklara ve yağışa sahip olduğu görülmektedir. İstasyonlardaki ortalama uzun yıllar yıllık toplam yağış değerleri 370-1125 mm arasında değişmektedir. Kıyı kesiminde meydana gelen yağışlar, bölgenin geri kalanına göre yüksek olup, en yüksek yağış Alanya ve Antakya istasyonlarında; en düşük yağış ise Mut ve Korkuteli istasyonlarında meydana gelmektedir. Bölgenin ortalama uzun yıllar yıllık sıcaklık

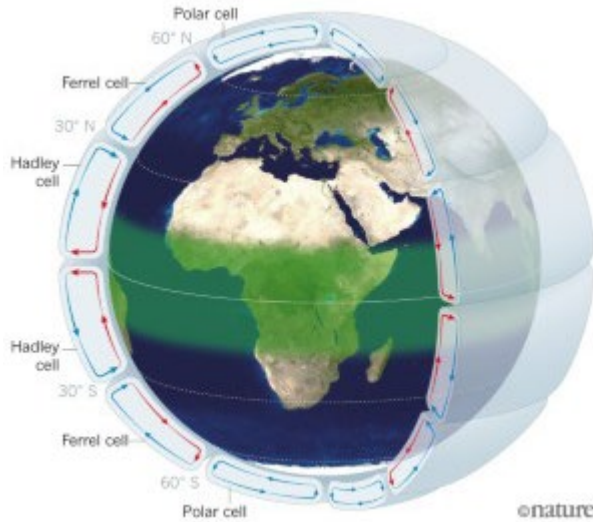
değerleri 9-20 °C arasında değişiklik göstermektedir. Dağlık bölgelerde ortalama sıcaklık 11.8 °C, kıyı bölgelerinde ise 19.1 °C olarak belirlenmiştir. Kıyı bölgelerinden dağlık bölgelere gidildikçe, rakıma bağlı olarak sıcaklıkta belirgin bir azalma meydana geldiği görülmektedir.

Çizelge 3. 1. Çalışmada kullanılan meteorolojik istasyonlarına ait coğrafi bilgiler

İstasyonlar No	İstasyon Adı	Rakım (m)	Enlem (K°)	Boylam (D°)	Yıllık Ort. Toplam Yağış (mm/yıl)	Yıllık Ort.Sıcaklık (°C/yıl)
17240	Isparta	1000	37.7848	30.5679	517.89	12.08
17255	K.Maraş	571	37.5760	36.9150	740.75	16.84
17300	Antalya	52	36.9063	30.7990	1084.21	18.56
17310	Alanya	13	36.5507	31.9803	1125.41	19.78
17320	Anamur	4	36.0686	32.8649	920.72	19.43
17330	Silifke	18	36.3824	33.9373	567.79	19.54
17340	Mersin/Yenişehir	5	36.7808	34.6031	596.56	19.62
17351	Adana Bölge	24	37.0005	35.4183	657.4	19.24
17370	İskenderun	8	36.5924	36.1582	753.36	20.19
17372	Antakya	160	36.2368	36.1329	1098.09	18.37
17375	Finike	3	36.3024	30.1458	960.47	19.22
17380	Kaş	163	36.2002	29.6502	790.56	19.65
17866	Göksun	1342	38.0240	36.4823	586.75	8.94
17882	Eğirdir	922	37.8377	30.8720	809.84	12.35
17898	Seydişehir	1134	37.4267	31.8490	770.46	11.79
17908	Kozan	124	37.4337	35.8188	822.09	19.44
17926	Korkuteli	1016	37.0565	30.1910	388.48	12.77
17936	Karaisalı	233	37.2506	35.0628	869.97	18.63
17952	Elmalı	1109	36.7372	29.9121	486.43	12.90
17956	Mut	333	36.6514	33.4339	370.09	18.03
17958	Erdemli	8	36.6268	34.3380	572.7	18.68
17960	Ceyhan	26	37.0153	35.7955	715.78	17.96
17962	Dörtyol	29	36.8244	36.1981	955.2	19.02
17970	Kale- Demre	8	36.2421	29.9790	829.23	18.60
17974	Gazipaşa	73	36.2715	32.3045	851.88	18.57
17979	Yumurtalık	13	36.7687	35.7903	819.09	19.50
17981	Karataş	9	36.5683	35.3894	780.65	19.15
17986	Samandağ	4	36.0814	35.9492	903.24	19.16

### 3.2.2. Küresel dolaşım modelleri

Güneş, ana ısı kaynağıdır ve Dünya'nın eğimi, eğriliği, atmosferi, bulutlar, kutuplardaki buz ve kar gibi faktörler nedeniyle dünyanın farklı bölgeleri farklı şekilde ısınır. Bu etkenler, kutuplarla ekvator arasında büyük bir sıcaklık farkı yaratır, ancak küresel dolaşım hücreleri, ekvatorun giderek daha sıcak olmasını ve kutupların giderek daha soğuk olmasını engelleyen doğal bir iklimlendirme sistemidir. Küresel dolaşım hücreleri, ısının tropikal enlemlerden kutup enlemlerine taşınmasını sağlayan dünya çapında bir rüzgâr sistemidir. Dünya yüzeyinin belli kısımlarında büyük ölçekli rüzgâr sirkülasyonları bulunur. Her yarımkürede, Troposfer' in tüm derinliği boyunca dolaşan üç hücre (Hadley, Ferrel ve Polar hücreleri) vardır. Bu hava dolaşımını Şekil 3.2.'de gösterilmektedir. Hadley hücresi, ekvatorun 30° kuzey ve güney enlemlerine kadar etkilidir ve Ekvator bölgesinden yükselen nemli havayı 30° enlemlerine taşır. Soğuyup yağışla nemini kaybeden hava, kuru hava kütleleri olarak 30° enlemlerine doğru yavaş yavaş çökerek Ekvatora doğru bir döngü oluşturur. Ferrel hücresi, 30°-60° kuzey ve güney enlemleri arasında etkilidir ve Hadley ve Kutup hücreleri arasında sirkülasyon sağlar. Kutup hücreleri, 60 ila 70 derece kuzey ve güneyden kutuplara kadar uzanan en küçük ve en zayıf hücrelerdir. Bu hücrelerdeki hava, en yüksek enlemlerde batır ve yüzeydeki daha düşük enlemlere doğru hareket eder (Xian ve ark., 2021).



Şekil 3. 2. Küresel atmosferik dolaşım (Heffernan, 2016)

GCM'ler, dünya atmosferinin veya okyanuslarının genel dolaşımını simüle eden modellerdir ve atmosferik dolaşım süreçlerinin fiziki yapısını temsil eden matematiksel denklemlerle ve verilere dayalı süreçleri kopyalayan ampirik hesaplamaların bir kombinasyonunu kullanır. Bu denklemler, akışkanlar mekaniğindeki temel denklemlere (kütlenin korunması, enerjinin korunması, momentumun korunması) dayanır. Gezegenel atmosfer veya okyanus için dolaşımla ilgili süreçler, karmaşık ve disiplinler arasıdır. Bu süreçlerin modellenmesi, tüm süreçlerin modelde temsil edilmesinin zorluğu, modellenecek süreç sayısı nedeniyle çok sayıda hesaplama yapılması ve belirsizlik nedeniyle birçok varsayım içerir. Bu atmosferik dolaşımlar, GCM'lerde matematiksel ve dinamik modeller ile temsil edilmektedir (Dabanlı, 2017).

Dünyanın farklı bölgelerinde farklı iklim araştırma kuruluşları tarafından hazırlanmış pek çok GCM bulunmaktadır. Geçmişten geleceğe iklim projeksiyonlarının değerlendirilmesinde önemli bir rehber olan GCM'ler iklim değişikliği ve etkilerinin araştırılmasında sıklıkla kullanılır (Noor ve ark., 2019; Guo ve ark., 2021). GCM'ler, küresel iklim değişikliğini tahmin etmek için geliştirilmiş materyaller olup, iklim sisteminin parametreleri arasındaki etkileşimlerin ve geri beslemelerin matematiksel gösterimini sağlar. IPCC'nin hazırlanmış olduğu emisyon senaryoları altında, küresel ölçekte sıcaklık, nem, basınç gibi atmosferik değişkenleri tahmin edebilmektedir (Biberoğlu, 2017).

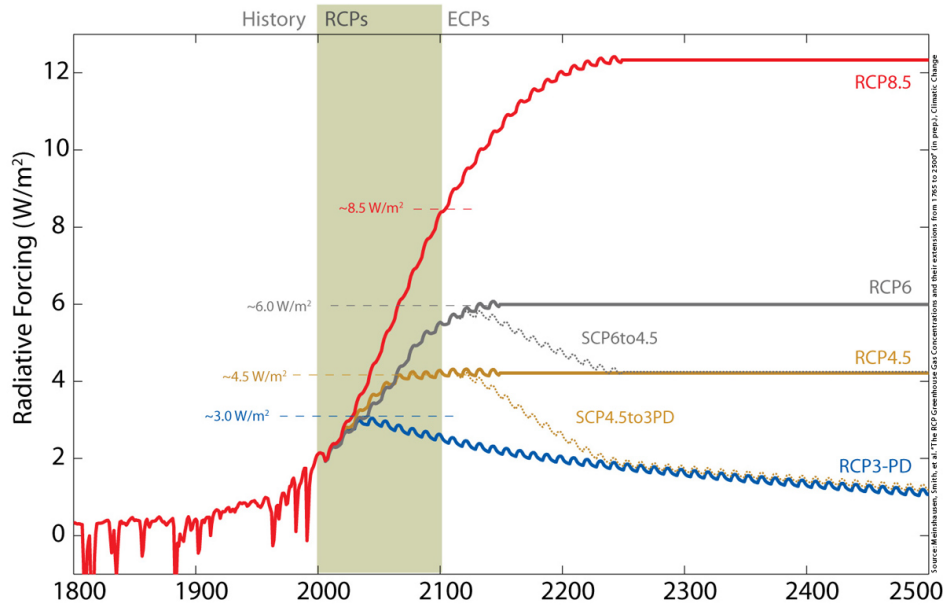
Bu tez çalışmasında, CMIP6 kapsamında yayınlanan 22 GCM'ye ait 1979-2015 yılları arasını kapsayan veriler, tarihsel gözlem verilerini; 2015-2100 yılları arası verileri ise gelecek yağış ve sıcaklıkları simüle etmek için kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan GCM'lerin tarihsel ve gelecek senaryolarına ait atmosferik veri çıktıları, Earth System Grid Federation (ESGF) veri portalı (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>) sitesinden temin edilmiştir. Gelecek projeksiyonlarında iki farklı SSP (SSP2-4.5, SSP5-8.5) senaryosu temel alınmıştır. GCM'lerin menşeleri, çözünürlükleri ve Çizelge 3.2.'de verilmiştir.

Çizelge 3. 2. Küresel dolaşım modelleri

CMIP6 Modeller	Enstitü/Ülke	Çözünürlük
ACCESS-CM2	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Australia	1,9° × 1,3°
BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center (BCC), China	1,1° × 1,1°
CAMS-CSM1-0	Chinese Academy of Meteorological Sciences, China	1,1° × 1,1°
CanESM5	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (CCCMA), Canada	2,8° × 2,8°
CanESM5-CanOE	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (CCCMA), Canada	2,8° × 2,8°
CESM2	National Center for Atmospheric Research (NCAR), USA	1,25° × 0,94°
CESM2-WACCM	National Center for Atmospheric Research (NCAR), USA	1,25° × 0,94°
CMCC-ESM2	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici Italy	1,3° × 0,9°
CNRM-CM6-1-HR	Centre National de Recherches Meteorologiques, France	0,5° × 0,5°
CNRM-ESM2-1	Centre National de Recherches Meteorologiques, France	1,4° × 1,4°
EC-Earth3-Veg	EC-Earth-Consortium, Europe	0,7° × 0,7°
FGOALS-g3	Chinese Academy of Sciences, China	2° × 2,3°
GFDL-ESM4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	1,25° × 1°
GISS-E2-1-G	Goddard Institute for Space Studies (NASA-GISS), USA	2,5° × 2,0°
HadGEM3-GC31-LL	Met Office Hadley Centre, UK	1,88° × 1,25°
INM-CM5-0	Academy of Sciences, Institute of Numerical Mathematics, Russia	2° × 1,5°
IPSL-CM6A-LR	Institut Pierre Simon Laplace, France	2,50° × 1,26°
MIROC6	The University of Tokyo, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	1,41° × 1,41°
MPI-ESM1-2-HR	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	0,937° × 0,937°
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute, Japan	1,125° × 1,125°
NorESM2-MM	NorESM Climate modeling Consortium (NCC), Norway	0,9375° × 1,25°
UKESM1-0-LL	Natural Environment Research Council and Met office, UK	1,88° × 1,25°

### 3.3. Paylaşılan Sosyoekonomik Yollar

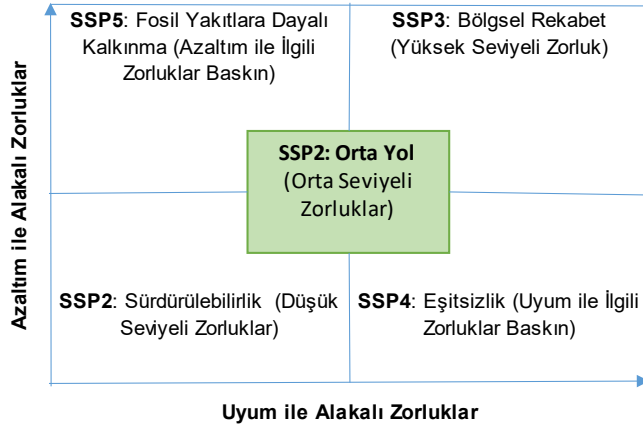
İklim senaryoları, iklim modellemelerinin en önemli kısmını oluşturur. IPCC tarafından 2007 yılında yayınlanan rapor, Emisyon Senaryoları Özel Raporu (Special Report on Emissions Scenarios-SRES) senaryolarına dayanmaktadır. SRES senaryoları, dört ana senaryo (A1, A2, B1, B2) ve bunların alt senaryolarından oluşur (Özdemir ve ark., 2020). Bu senaryolarda, çeşitli sosyoekonomik durumlara göre oluşturulmuş emisyon senaryolarına bağlı ışımsal zorlama değerleri hesaplanıp GCM'lerde kullanılmıştır. AR5'i desteklemek amacıyla üretilen senaryolar ise Temsili Konsantrasyon Yolları (Representative Concentration Pathways-RCP) senaryolarıdır. SRES senaryolarına benzer şekilde, bu senaryolar da ışımsal zorlama seviyelerine göre dört farklı senaryo (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5) olarak belirlenmiştir. Bu senaryolar, en düşük ışımsal zorlamadan (RCP2.6) en büyük ışımsal zorlama (RCP8.5) senaryosuna doğru sıralanmıştır. Şekil 3.3.'de gösterildiği gibi, bu senaryolara ait ışımsal zorlama değerleri en iyimser senaryodan en kötümser senaryoya doğru sırasıyla 2.6, 4.5, 6, 8.5  $W/m^2$ 'dir. Bu senaryolardaki daha yüksek emisyon değerleri, daha yüksek sera gazı emisyonları ve dolayısıyla daha yüksek küresel sıcaklıklar ile iklim değişikliğinin daha belirgin etkileri anlamına gelir.



Şekil 3. 3. Temsili Konsantrasyon Yolları (RCP)(Dabanlı, 2017)

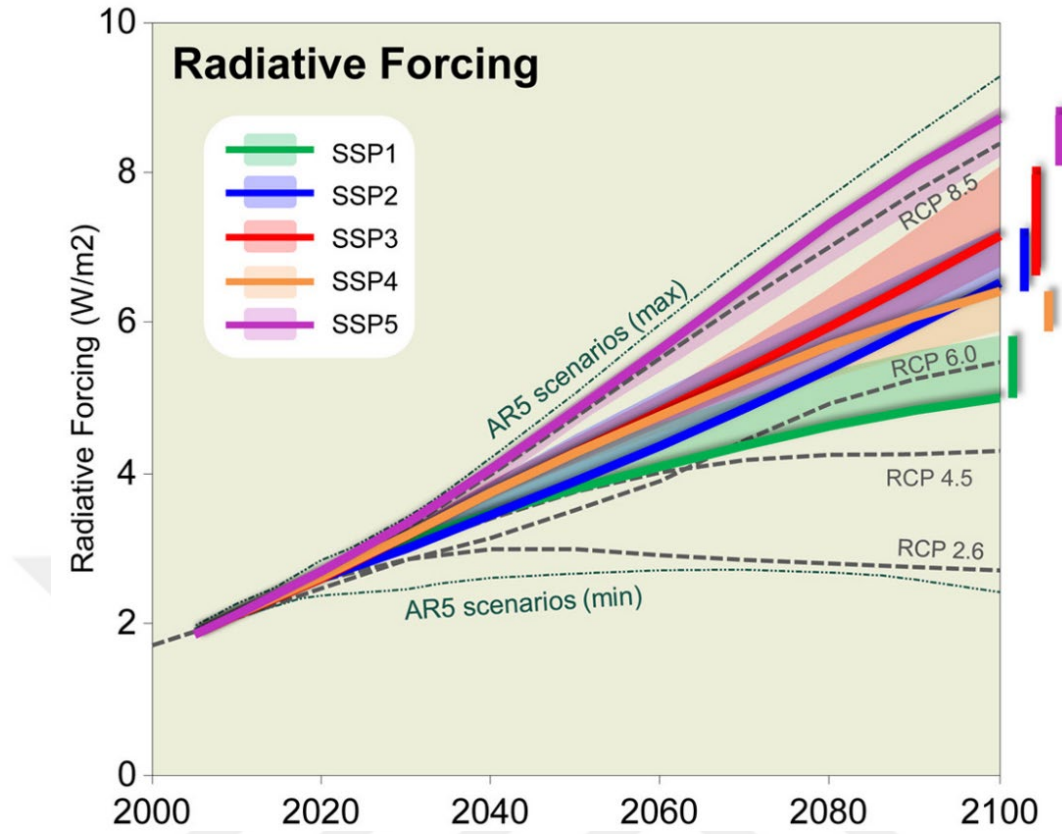
RCP'ler, sera gazı konsantrasyonları ve yüzyılın sonuna kadar meydana gelebilecek ısınma miktarı için çeşitli yollar belirlerken, bu senaryolarda herhangi bir sosyoekonomik durum göz önünde bulundurulmamıştır. Buna karşılık, IPCC'nin Altıncı Değerlendirme Raporu (AR6) altyapısını oluşturan Paylaşılan Sosyoekonomik Yollar (Shared Socioeconomic Pathways-SSP) senaryoları, gelecek yüzyılda nasıl değişebileceklerini modellemek amacıyla sosyoekonomik faktörlere odaklanmaktadır. Bu faktörler arasında nüfus, ekonomik büyüme, eğitim, kentleşme ve teknolojik gelişme hızı gibi unsurlar yer alır. SSP senaryoları, sosyoekonomik modellemeler ile RCP senaryolarının hedeflerini birleştirerek, iklim değişikliğine yönelik olarak dünyanın gelişebileceği beş farklı yol sunar (Özdemir ve ark., 2020). Bu SSP tabanlı senaryolar, bugüne kadar oluşturulmuş en karmaşık senaryolardır ve iddialı emisyon azaltımından devam eden küresel büyümeye kadar geniş bir yelpazeyi kapsar (O'Neill ve ark., 2017).

SSP'ler, farklı sosyoekonomik gelişme düzeylerini tanımlayan beş kategoriye dayanır: gelişim ve eşitlik odaklı sürdürülebilir kalkınma (SSP1), orta düzey kalkınma (SSP2), bölgesel rekabetçi kalkınma (SSP3), eşitsizliğin arttığı bir dünya (SSP4) ve fosil yakıtı dayalı hızlı ve kısıtlamasız kalkınma (SSP5) (O'Neill ve ark., 2017). RCP'ler, sera gazı konsantrasyonları ve yüzyılın sonuna kadar meydana gelebilecek ısınma miktarını ele alırken, SSP'ler, emisyon azaltımının sağlanıp sağlanamayacağı aşamaları ve bu zorlukların derecelerini de tanımlar. Şekil 3.4.'de gösterilen SSP'lerin yollarına ait emisyon azalımı ve uyum zorluk tasvirleri, bu farklılık ve çeşitliliği göstermektedir.



Şekil 3. 4. Geliştirilen sosyoekonomik yollar (SSP)

SSP senaryoları, küresel iklim değişikliğine karşı mücadelede farklı zorluklar ve yaklaşımları tanımlar: SSP1, sürdürülebilirlik kalkınma, azaltma ve uyum sağlama konusunda düşük zorluklar sunarken; SSP2, orta düzey kalkınma, azaltma ve uyum sağlama konusunda orta zorlukları içerir. SSP3, bölgesel rekabet, azaltma ve uyum sağlama konusunda yüksek zorluklarla karşılaşırken; SSP4, eşitsizlik, azaltma konusunda düşük, ancak uyum sağlama konusunda yüksek zorlukları ifade eder. Son olarak, SSP5, fosil yakıtlı kalkınma, azaltma konusunda yüksek, fakat uyum sağlama konusunda düşük zorluklarla karakterize edilir. Bu senaryoların etkisi, küresel iklim değişikliğinin olası ışımsal zorlama verileriyle Şekil 3.5.'te gösterilmiştir. SSP senaryolarınının taban çizgileri, 2100 yılına kadar 5,0 ile 8,8 W/m<sup>2</sup> arasında değişen geniş bir aralığı kapsar. Bu geniş aralık, farklı SSP senaryolarınının küresel ısınma üzerinde ne kadar çeşitli etkiler yaratabileceğini gösterir ve bu senaryoların gelecekteki iklim değişiklikleri üzerindeki potansiyel etkilerini anlamak için önemlidir.



Şekil 3. 5. Radyoaktif zorlamada küresel emisyonlar ve küresel ortalama değışimi

### 3.4. İstatistiksel Ölçek İndirgeme

#### 3.4.1. Atmosferik değışkenlerin belirlenmesi

İstatistiksel ölçek indirgeme yöntemlerinde, atmosferik bağımsız değışkenlerin (tahminleyiciler) seçimi, sürecin başarılı ve önemli bir başlangıç aşamasını oluşturur. Bu seçim, atmosferik parametrelerin bölgedeki yağış ve sıcaklıkları ne kadar iyi açıklayabildiği ile doğrudan ilişkilidir (Biberoğlu, 2017). Dolayısıyla, modelde kullanılacak etkili ve doğru atmosferik değışkenlerin seçimi, tahmin edilecek yağış ve sıcaklık parametrelerinin tahmin doğruluğunu artıracaktır.

Bu tez çalışması kapsamında kullanılacak bağımsız atmosferik değışkenler Çizelge 3.3.'te detaylı olarak verilmiştir. Çizelgede, atmosferik değışkenlerin isimleri ve birimleri belirtilmiş olup, 200, 500, 700 ve 850 değerleri, atmosferik basınç

seviyelerini hPa cinsinden ifade etmektedir. Bu değişkenler; hava sıcaklığı, atmosferdeki farklı basınç seviyelerindeki hava sıcaklığını, deniz seviyesi basıncı, belirlenen noktanın deniz seviyesine göre hava basıncını, bağıl nem, havadaki nem miktarının, aynı havanın taşıyabileceği maksimum neme oranını, jeopotansiyel yükseklik, birim kütle için deniz seviyesi referans alınarak yerçekimi alanı içinde birim yüksekliğe çıkartılması için gerekli enerjiyi, yeryüzü hava sıcaklığı, yeryüzünden 2 m yükseklikte ölçülen hava sıcaklığını, yağış, birim zamanda metrekareye düşen yağış miktarını, hava basıncı ise yeryüzünde ölçülen hava basıncını ifade etmektedir.

Çizelge 3. 3. Bağımsız atmosferik değişkenler

Tahminleyiciler	Birimi	Atmosferik Seviyeler	Değişken Sayısı
Hava Sıcaklığı	K	200, 300,500,700, 850	5
Deniz Seviyesi Basınç	Pa	Deniz Seviyesi	1
Bağıl Nem	%	200, 300,500,700, 850	5
Jeopotansiyel Yükseklik	m	200, 300,500,700, 850	5
Yüzeye Yakın Hava sıcaklığı	K	Yüzey	1
Yağış	Kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	Yüzey	1
Hava Basıncı	Pa	Yüzey	1

Çalışma kapsamında kurulacak modellemede, ilk adım olarak tahminleyici olarak kullanılacak bağımsız atmosferik değişkenlerin belirlenmesi gerekmektedir. Tahmin edilecek değişkenler olan yağış ve sıcaklık ile düşük ilişki gösteren bağımsız değişkenlerin modele tahminleyici olarak dahil edilmesi, modelin performansını olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, istatistiksel ölçek indirgeme modeli kurulmadan önce, bağımsız değişkenler ile bağımlı değişkenler arasındaki doğrusal ilişkiye bakarak etkili bağımsız değişkenler belirlenmiştir.

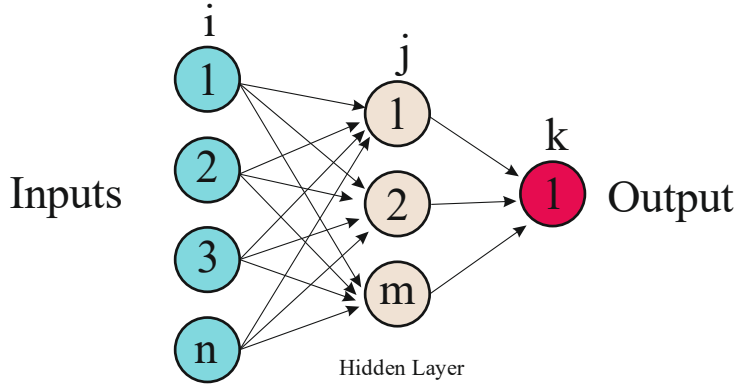
Bu tez çalışmasında, seçilen 28 istasyonun yağış ve sıcaklık değerlerini aynı anda açıklayabilecek atmosferik parametrelerin seçimi, Pearson korelasyon katsayısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Korelasyon katsayısı, iki veri seti arasındaki doğrusal ilişkinin varlığını ve bu ilişkinin güçlü, zayıf, pozitif ya da negatif olup olmadığını belirlemek için kullanılan bir istatistiksel ölçüm tekniğidir. Bu yaklaşım sayesinde,

yağış ve sıcaklık gibi bağımlı değişkenlerle ilişkili atmosferik parametreler seçilebilmektedir.

### 3.4.2. Yapay sinir ağları (YSA)

Yapay Sinir Ağı (YSA) yöntemi, hidro-meteoroloji gibi farklı birçok alanda yaygın olarak kullanılan kavramsal bir tekniktir. Bu yöntem, analitik ilişkiler içermeyen modelleme problemlerinde kolaylık sağlar. YSA modelleri, parametreler arasındaki içsel doğrusal olmayan ilişkileri karmaşık problemlere eşleştirmeye çalışır. Farklı YSA modeli oluşturmak için çeşitli mimariler bulunurken, İleri Beslemeli Hata Geri Yayılım Yapay Sinir Ağı (feed-forward error backpropagation artificial neural network-FFEBPYSA) tekniği en sık kullanılanlardan biridir (El-Mahdy ve ark., 2021). Şekil 3.6.'de gösterilen tipik bir FFEBPYSA mimarisinde, giriş katmanında  $n$  nöron, gizli katmanda  $m$  nöron ve çıkış katmanında  $k$  nöron bulunur. Bu çalışmada, her bir istasyonda her bir GCM modeli için yağış ve sıcaklık ile en yüksek korelasyona sahip beş parametre için bir model oluşturulmuştur. Yani,  $n$  değeri bu çalışmada beş olarak alınmıştır.  $k$  değeri ise bir olup (yağış veya sıcaklık), gizli katman sayısı her bir modelde 1 ile 10 arasında deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiştir. En düşük Root Mean Square Error (RMSE) değerini veren gizli katman sayısı kullanılmıştır.

Makine öğrenmesi yöntemleri, doğaları gereği eğitilmek için verilere ihtiyaç duyarlar. Ancak, aşırı öğrenme (overfitting) problemini değerlendirmek için eğitimde kullanılmayan veri setinde de test edilmeleri gereklidir. Bu amaçla, proje kapsamında, ölçülmüş geçmiş verileri tahmin etmek için GCM verileri girdi olarak kullanılmış, verilerin ilk %70'i (1979-2004) eğitim, kalan %30'u (2005-2015) ise test sürecinde kullanılmıştır. GCM'lerin Akdeniz bölgesindeki ölçülmüş yağış ve sıcaklık verilerini tahmin etme başarısını belirlemek için, 22 (Model sayısı) \* 28 (İstasyon sayısı) \* 2 (Yağış ve sıcaklık) olmak üzere toplam 1232 model oluşturulmuştur.



Şekil 3. 6. YSA'a ait tipik model mimarisi

### 3.4.3. GCM'lerin performansının değerlendirilmesi

GCM'lerin istatistiksel ölçek indirme yöntemi kullanılarak istasyon ölçeğinde indirgenmiş atmosferik parametrelerle, istasyon ölçeğinde gözlemlenmiş bağımlı değişkenleri ne kadar iyi tahmin edebildiklerinin belirlenmesi için çeşitli istatistiksel performans metrikleri kullanılmıştır. Bu metrikler, bir GCM'nin gözlemlenen verileri ne kadar başarılı şekilde simüle ettiğini ölçmek için bir ölçüdür (Gómez-Navarro ve ark., 2012). Çalışmada kullanılan istatistiksel performans kriterlerinin matematiksel formülleri, sırasıyla denklem (3.1.), (3.2.), (3.3.), (3.4.) ve (3.5.)'te verilmiştir. Burada  $P_{obs}$ , sinoptik gözlem istasyonunda gözlenen;  $P_{sml}$ , GCM modelleri tarafından simüle edilen;  $\overline{P_{obs}}$  ve  $\overline{P_{sml}}$  ise bu verilerin ortalamasını; N ise veri sayısını temsil etmektedir.

Korelasyon Katsayısı (Correlation coefficient -CC), iki veri seti arasındaki ilişkiyi belirlemede kullanılan geleneksel bir parametredir ve -1 ile +1 arasında değerler alır. CC'nin +1 değerine yaklaşması yüksek uyumu ifade eder. Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) (Nash & Sutcliffe, 1970),  $-\infty$  ile 1 arasında değerler alır ve 1 olması, uyumun mükemmel olduğunu gösterir. 0 ile 1 arasında bir değer alması genelde kabul edilebilir performansı ifade eder ve gözlem verilerinin ortalamasına göre modellerin tahmin becerilerini ölçer (Moriasi ve ark., 2007; Hassan ve ark., 2020). Normalleştirilmiş kök ortalama kare hatası (Normalized Root Mean Square Error-nRMSE), klasik RMSE'nin gözlem aralığına göre normalleştirilmiş halidir ve 0 ile 1 arasında bir değer alır. 0'a yakın olması yüksek uyumu gösterir. Kling-Gupta

Verimlilik Metriği (Kling-Gupta efficiency KGE) ise,  $\sigma_{\text{model}}$  ve  $\sigma_{\text{obs}}$  değerleri ile, yani GCM ile simüle edilen ve gözlemlenen verilerin standart sapmalarını içerir ve  $-\infty$  ile 1 arasında değişir. 1'e yakın değerler model tahmin performansının yüksek olduğunu gösterir. Değiştirilmiş Uyumluluk İndeksi (Modified index of agreement - md), yağış veya sıcaklık gibi değişkenlerin gözlemlenen ve model tarafından tahmin edilen verileri arasındaki uyumu belirler ve 0 (uyum yok) ile 1 (tam uyum) arasında değişir (Willmott, 2013). Bu performans metrikleri, GCM'lerin tahmin kabiliyetini değerlendirmede hayati önem taşımaktadır.

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (P_{sml} - \overline{P_{sml}})(P_{obs} - \overline{P_{obs}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_{sml} - \overline{P_{sml}})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_{obs} - \overline{P_{obs}})^2}} \quad (3.1)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_{sml,i} - P_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^N (P_{obs,i} - \overline{P_{obs}})^2} \quad (3.2)$$

$$NRMSE = \frac{\left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{sml,i} - P_{obs,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{P_{obs(\max)} - P_{obs(\min)}} \quad (3.3)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(CC - 1)^2 + \left( \frac{\overline{P_{sml}}}{\overline{P_{obs}}} - 1 \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{\text{model}} / \overline{P_{sml}}}{\sigma_{\text{obs}} / \overline{P_{obs}}} - 1 \right)^2} \quad (3.4)$$

$$md = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |P_{obs,i} - P_{sml,i}|}{\sum_{i=1}^N (|P_{sml,i} - \overline{P_{obs}}| + |P_{obs,i} - \overline{P_{obs}}|)} \quad (3.5)$$

Her bir istasyonda en başarılı GCM'yi belirlemek için yukarıda bahsedilen performans kriterleri kullanılmıştır. Ancak, farklı başarı kriterleri farklı istasyonlarda farklı modellerin başarılı olduğunu gösterebilir. Bu nedenle, tüm kriterlerin birlikte değerlendirilmesi ve buna göre bir model başarı sıralaması belirlemek amacıyla

Kapsamlı Derecelendirme Endeksi (Comprehensive Rating Index-CRI) yöntemi (Denk. 3.6.) kullanılmıştır. CRI yöntemi, GCM'lerin farklı lokasyonlardaki performanslarını sıralamak için yaygın olarak tercih edilen etkili bir yöntemdir (You ve ark., 2018; Rivera ve Arnould, 2020). Bu indeks, birden fazla GCM arasında bir model topluluğu (MME) oluşturulurken, genel sıralamalara göre bir tür nihai karar mekanizması işlevi görür (Bağçacı ve ark., 2021). Bu yaklaşım, farklı performans kriterlerine dayalı olarak çeşitli modellerin genel başarılarını objektif bir şekilde değerlendirmeye ve en uygun GCM'lerin seçilmesine imkân tanır.

$$CRI = 1 - \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n Rank_i \quad (3.6)$$

#### 3.4.4. Çoklu model topluluğu (Multi model ensemble-MME)

GCM'lerdeki gelişmelere rağmen, iklim değişikliği projeksiyonları ve etki değerlendirmelerindeki en büyük zorluk, bölgeyi temsil eden doğru GCM'lerin seçimi olmaktadır. GCM simülasyonları, model çözünürlüğü, matematiksel formülasyon, ilk varsayımlar ve kalibrasyon süreçleri gibi çeşitli kaynaklardan gelen belirsizlikleri içerir. Bu belirsizlikler, GCM'lerin bölgesel veya yerel ölçekte güvenilir iklim projeksiyon çalışmalarında kullanımını sınırlar (Khan ve ark., 2018; Kamruzzaman ve ark., 2021). Bu belirsizlikleri en aza indirmek için, gözlemlenen verilerin simülasyonunda başarısız olan modellerin değerlendirme dışı tutulması gerekir (Lutz ve ark., 2016; Lin ve Tung, 2017; Khan ve ark., 2018; Salman ve ark., 2018; Ahmed ve ark., 2019b; Kamruzzaman ve ark., 2021).

GCM seçimi, modellerin geçmiş simüle etme performansı ve zarf yöntemine dayanır (Salman ve ark., 2018; Iqbal ve ark., 2020). Geçmiş performans yöntemi, modellerin mevcut ve yakın geçmiş iklimi modelleme yeteneğine göre değerlendirilirken, zarf yaklaşımı belirli bir iklim değişkeni için geniş bir projeksiyon yelpazesini kapsayan modelleri seçer (Lutz ve ark., 2016). Genellikle, GCM'lerin geçmiş iklim simülasyonlarındaki performansı, seçim sürecinde temel olarak kullanılır.

Bireysel GCM modellerindeki belirsizlikler, yanlışlıklar ve mekânsal farklılıklar nedeniyle, araştırmacılar tarafından Çoklu Model Topluluğu (Multi Model Ensemble-MME) kullanılması gerektiği vurgulanmıştır. GCM'lerdeki karmaşık atmosferik fizikten kaynaklanan doğal hatalar ve belirsizlikler, MME'nin bireysel GCM'lere kıyasla daha iyi bir performans sergilediğini göstermiştir (Mohobane ve ark., 2014). MME'ler, çeşitli GCM'lerden gelen verilerin bir araya getirilmesiyle oluşturulduğundan, projeksiyonların güvenilirliğini artırır (Pavan ve Doblas-Reyes, 2000; Knutti ve ark., 2010; Ahmed ve ark., 2020). MME'ler genellikle basit topluluk ortalaması ve ağırlıklı topluluk ortalaması yöntemleri ile oluşturulur: Basit topluluk ortalama yönteminde tüm modellere eşit ağırlıklar atanırken, ağırlıklı topluluk ortalaması yönteminde ise modeller geçmiş iklimi simüle etme becerilerine göre ağırlıklandırılır. Basit ortalama topluluğu yönteminin uygulaması nispeten daha kolay olup genellikle bireysel GCM'lerden daha iyi performans gösterdiği bildirilmiştir (Ahmed ve ark., 2020).

Bu çalışmada, performans kriterlerine göre belirlenen en iyi GCM'ler ile basit topluluk ortalaması yöntemi kullanılarak MME'ler oluşturulmuştur. MME'ler oluşturulurken tüm modellerin basit ortalaması alınması yerine, belli sayıda model kullanılmıştır. Bu amaçla, oluşturulan MME'ler, en iyi performans gösteren 2 GCM'den başlayarak, en iyi 3'lü, 4'lü GCM şeklinde devam etmiştir. Her oluşturulan MME modelinin tarihi gözlem verilerini tahmin etme performansına bakılarak, optimum sayıda GCM sayısı ile MME oluşturulmuştur. Bu yaklaşım ile GCM'lerin bireysel belirsizliklerini azaltarak, iklim projeksiyonlarının güvenilirliğini artırmayı hedeflenmiştir.

### 3.5. Meteorolojik Kuraklık

Meteorolojik kuraklık, uzun yıllar yağış ortalamasından sapmalar gösteren yağış miktarlarının azalmasına bağlı olarak meydana gelir (Şener, 2021). Bu tür kuraklık, hidrolojik ve tarımsal kuraklığın temelini oluşturur ve bu türlerin başlangıç noktası olarak kabul edilir (Yuan ve ark., 2017; Zeng ve ark., 2022). Kuraklığın kapsamlı analiz ve değerlendirmesi için araştırmacılar genellikle kuraklık indislerini kullanır.

Kuraklık olaylarının karmaşık doğası nedeniyle, çok değişkenli göstergelerin kullanımını son yıllarda artmıştır (Hao ve Singh, 2015; Spinoni ve ark., 2018).

Bilim dünyası tarafından kullanılan pek çok kuraklık indisi bulunmaktadır. En yaygın kullanılanlar arasında Palmer Kuraklık İndeksi (Palmer Drought Severity Index-PDSI) (Palmer, 1965), Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (McKee ve ark., 1993) ve Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndeksi (Vicente-Serrano ve ark., 2010) bulunmaktadır. Bu çalışmada, 3, 6 ve 12 aylık zaman ölçeklerine göre hesaplanmış olan SPI ve SPEI indeksleri kullanılmış ve yöntem kısaltmasının yanına ilgili zaman ölçeğinin ay sayısı eklenerek ifade edilmiştir (örneğin üç aylık için SPI3 ve SPEI3). Kuraklık sınıflandırmasında, iki yöntem için Vicente-Serrano ve ark. (2010) tarafından önerilen ve Çizelge 3.4.'te verilen aralıklar kullanılmıştır.

Çizelge 3. 4. SPI/SPEI değerlerine göre kuraklık sınıflandırması (McKee ve ark., 1993)

SPI/SPEI Değerleri	Sınıflandırma
$2.00 \leq \text{SPI/SPEI}$	Aşırı Nemli (AN)
$1.50 \leq \text{SPI/SPEI} < 2.00$	Çok Nemli (ÇN)
$1.00 \leq \text{SPI/SPEI} < 1.50$	Orta Nemli (ON)
$0 \leq \text{SPI/SPEI} < 1.00$	Hafif Nemli (HN)
$-1.0 < \text{SPI/SPEI} \leq 0$	Hafif Kurak (HK)
$-1.5 < \text{SPI/SPEI} \leq -1.0$	Orta Kurak (OK)
$-2.0 < \text{SPI/SPEI} \leq -1.5$	Çok Kurak (ÇK)
$-2.0 \geq \text{SPI/SPEI}$	Aşırı Kurak (AK)

### 3.5.1. Standartlaştırılmış Yağış İndeksi

McKee ve ark. (1993) tarafından önerilen Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (Standardized Precipitation Index-SPI) yöntemi, farklı zaman ölçeklerinde kuraklık şiddetini temsil eden indeksleri hesaplar. Bu yöntem, uzun vadeli yağış verilerinin bir Gamma olasılık dağılımına uydurulmasını ve ardından standart bir normal dağılıma dönüştürülerek SPI değerlerinin hesaplanmasını içerir (Gumus ve Algin, 2017). Meteorolojik kuraklığın belirlenmesinde sıklıkla kullanılan bu yöntem hesaplamada sadece yağış verilerini kullanır ve dünya genelinde ve ülkemizde oldukça yaygın tercih edilmektedir (Şimşek ve ark., 2023). SPI'nin karmaşık olmayan uygulama tekniği, geniş bir uygulama alanı sunar. SPI'nin normalize edilmiş özelliği, farklı zaman serilerine rahatlıkla uygulanabilmesini sağlar. SPI yönteminde zaman ölçekleri çeşitli

kuraklık türleriyle eşleştirilmiştir, örneğin 1 aylık SPI meteorolojik kuraklık, üç ve altı aylık SPI (SPI-3 ve SPI-6) tarımsal kuraklık, dokuz ve 12 aylık SPI (SPI-9 ve SPI-12) ise hidrolojik kuraklık göstergeleri ile eşleştirilmiştir (Dabanlı, 2017).

Gama dağılımı için olasılık dağılım fonksiyonu matematiksel olarak Denklem 3.7’de şöyle hesaplanabilir  $g(x)$ ;

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, x > 0 \quad (3.7)$$

Burada  $g(x)$  Gama dağılım,  $x$ : yağış miktarını ( $x > 0$ )  $\alpha > 0$ ,  $\alpha$  şekil parametresi,  $\beta > 0$  ölçek parametresi ve  $\Gamma(\alpha)$  gama fonksiyonunu ifade etmektedir.  $\alpha$  ve  $\beta$  gama teorik olasılık dağılım modelinin parametreleridir.

$\alpha$  ve  $\beta$  hesaplamaları Denklem 3.8’de verilmiştir.

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}}\right) \text{ ve } \beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (3.8)$$

Denklem 3.8’de bulunan A değeri Denklem 3.9’da verilmiştir.

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (3.9)$$

$n$ ; yağış gözlemlerinin sayısını ifade etmektedir. Herhangi veriye ait kümülatif olasılık değeri aşağıda Denklem 3.10’da verilen Gama kümülatif olasılık dağılım fonksiyonundan elde edilir

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (3.10)$$

Gamma dağılım fonksiyonunun  $x=0$  için tanımsız olması durumunda kümülatif olasılık yeniden aşağıdaki Denklem 3.11’de tanımlanabilir.

$$H(x) = q + (1 - q) \times G(x) \quad (3.11)$$

Burada  $q$  sıfırın olasılığıdır.  $m$ , yağış serisindeki sıfır sayısıdır. Buna göre  $q$  Denklem 3.12'de hesaplanabilir.

$$q = \frac{m}{n} \quad (3.12)$$

$$SPI = \frac{\bar{x}_i - x_i}{\sigma} \quad (3.13)$$

Burada;

SPI: Standartlaştırılmış Yağış İndeksi

$x_i$  : Yağış miktarının normalleştirilmiş miktarı,  $\bar{x}_i$  : Her bir istasyon için seçilen zaman aralığında yağış ortalaması,  $\sigma$ : Her bir istasyona için yağış verilerinin zaman aralığı içindeki standart sapmasını ifade eder.

### 3.5.2. Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndeksi

Vicente-Serrano ve ark. (2010) tarafından önerilen Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndeksi (Standard Precipitation Evapotranspiration Index-SPEI), yağış parametresinin yanında diğer iklimsel parametreleri de hesaba katarak çoklu sayısal bir özellik sunar. SPEI değerlerinin hesaplanması için, zaman ölçeklerinde üç parametrelili Log-logistik teorik olasılık dağılım modeli kullanılır. Bu yöntemde indis değeri, aylık yağış ve potansiyel evapotranspirasyon (PET) arasındaki su dengesine dayanarak hesaplanır. PET, yeterli su alarak aktif büyüyen, standart yükseklikteki yeşil çimlerin kullandığı su miktarını ifade eder ve gerçek buharlaşma, bu su talebi ve mevcudiyetine bağlıdır. Hidro-iklim sisteminin su ihtiyacını anlamada yardımcı olan PET'in doğru hesaplanması, etkili su yönetimi için kritik öneme sahiptir. SPEI yönteminde, her ay ( $i$ ) için aylık yağış ( $P$ ) ile Thornthwaite (1948) yöntemi ile hesaplanmış PET arasındaki fark ( $D$ ), indeks değerinin hesaplanmasında kullanılır (Denklem 3.14). Bu yöntem, kuraklık analizlerinde PET'nin etkilerini de dikkate

olarak daha kapsamlı bir değerlendirme sağlar. SPEI, iklim değişikliğinin ve değişen hava koşullarının etkilerini anlamak için önemli bir araçtır, çünkü bu indeks, yağışın yanı sıra sıcaklık gibi diğer iklim faktörlerini de içerecek şekilde tasarlanmıştır.

$$D_i = P_i - PET_i \quad (3.14)$$

Giriş parametresi olarak sadece hava sıcaklığına ihtiyaç duyan en basit yöntemlerden olan Thornthwaite yöntemi (Thornthwaite, 1948) PET değeri matematiksel olarak Denklem 3.15'teki gibi ifade edilir;

$$PET = 16k \left( \frac{10T}{I} \right)^m \quad (3.15)$$

$$I = \sum_{1}^{12} i \quad (3.16)$$

$$i = \left( \frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad (3.17)$$

$$m = 0,49 + 0,0179I^2 + 0,0000771I^3 + 0,000000675I^3 \quad (3.18)$$

Burada;  $T$ , Aylık ortalama hava sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $k$ , istasyonun bulunduğu enlem göre değişen enlem düzeltme katsayısı,  $I$ , yıllık termal indeksi aylık termal indekslerin ( $i$ ) toplamıdır.  $m$  ise  $I$ 'ya bağlı bir katsayıdır.

### 3.6. Uygulama Metodolojisi

Çalışma kapsamında uygulanacak metodoloji aşağıda verilmiş olup, ayrıca metodolojinin akış şeması Şekil 3.7.'de gösterilmiştir.

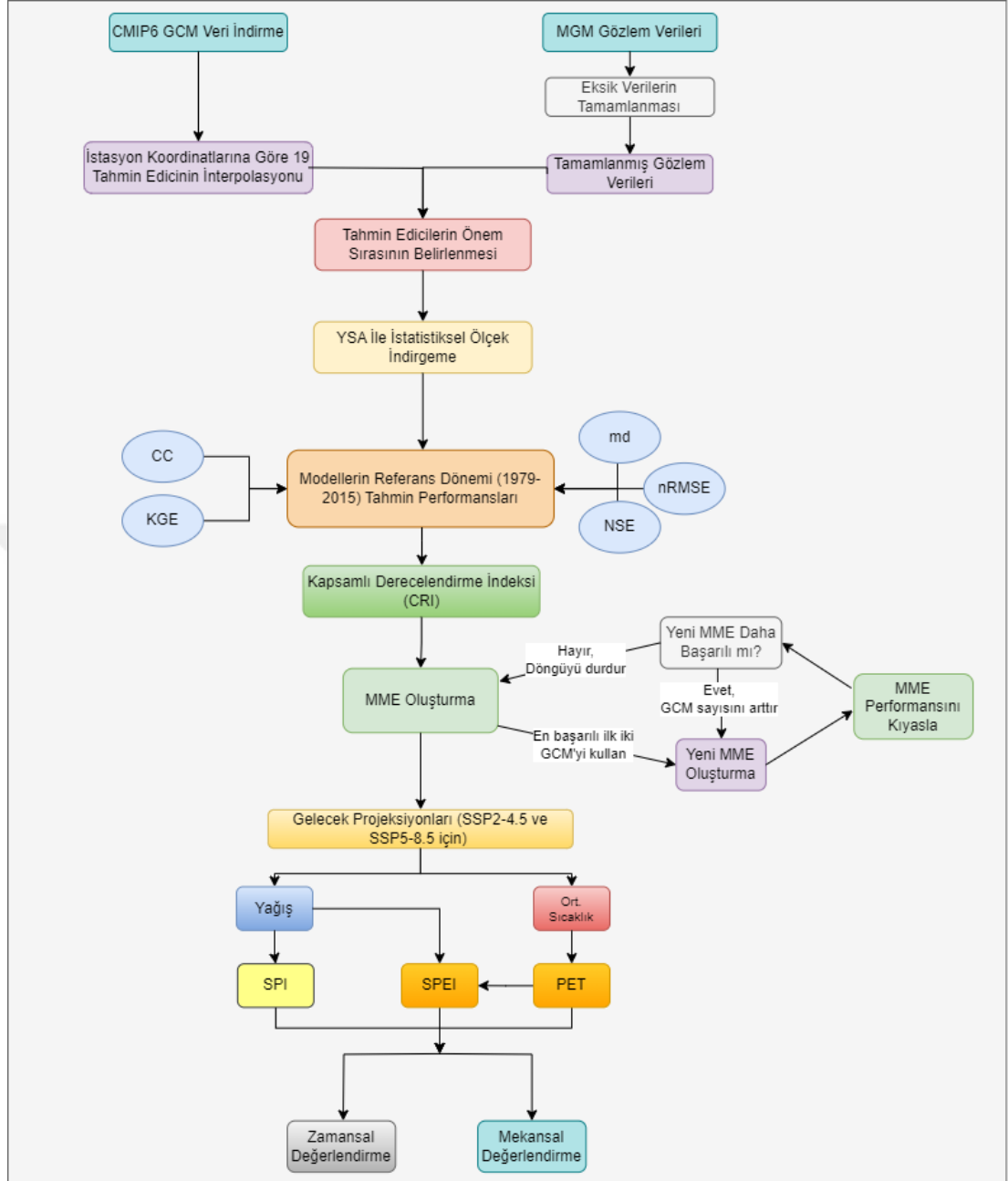
1. Bu çalışmada, MGM'den 1979-2015 yılları arasındaki aylık toplam yağış ve aylık ortalama sıcaklık verileri temin edilmiştir. Eksik veriler, komşu gözlem istasyonlarından alınan yağış ve sıcaklık verileriyle yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak tamamlanmıştır.

2. İstatistiksel Ölçek İndirgeme işlemi için, CMIP6 kapsamındaki 22 adet GCM'ye ait tarihsel iklim verisi <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/> adresinden .nc dosya formatında indirilmiştir. Bu 19 adet atmosferik bağımsız bu değişkenlerle ilgili teknik detaylar Çizelge 3.3.'de verilmiştir.
3. GCM verileri, ters mesafe ağırlıklı ortalama yöntemi kullanılarak, gözlem istasyonunun coğrafi konumuna göre en yakın dört GCM grid noktasından elde edilmiştir, böylece ilgili istasyon koordinatlarına ait GCM veri seti oluşturulmuştur.
4. Model oluşturma sürecinde, tahmin edicilerin sayısını azaltmak ve model karmaşıklığını önlemek için, değişkenler arasındaki ilişkiyi belirlemede korelasyon katsayısı yaklaşımı kullanılmıştır. Model, en yüksek ilişkiye sahip üç tahmin edici ile başlayarak, değişken sayısı artırılmış ve model performansı düşene kadar bu süreç devam ettirilmiştir. Bu değişken sayısı genel olarak 1 ile 5 arasında değişmektedir.
5. GCM'lerde bulunan 19 adet atmosferik bağımsız değişkenle, ölçülen bağımlı değişkenler (yağış ve ortalama sıcaklık) arasında yapay zekâ tabanlı bir tahmin modeli kurulmuştur.
6. Her bir GCM'nin istasyonlardaki bağımlı değişkenleri (yağış ve sıcaklık) simüle etme becerileri, bir sonraki bölümde detayları verilen CC, NSE, nRMSE, KGE ve md gibi literatürde sıklıkla tercih edilen performans kriterleri kullanılarak değerlendirilmiştir.
7. Akdeniz Bölgesindeki farklı istasyonlarda farklı GCM'lerin daha başarılı olabileceği ve farklı performans kriterlerine göre değişik sonuçlar verebileceği düşünülerek, farklı performans kriterlerini ortak değerlendirme yeteneği olan Kapsamlı Derecelendirme Endeksi (Comprehensive Rating Index-CRI) yöntemi kullanılmış ve her bağımlı değişken için bölgeyi en iyi temsil eden GCM'ler belirlenmiştir.
8. Belirlenen GCM'ler kullanılarak, bölge için uygulanabilir bir MME oluşturulmuştur. Bu işlemde, CRI parametresine göre en başarılı iki modelin ortalaması alınmış, ardından en başarılı üç, dört ve beş modelin ortalamaları alınarak MME'lar oluşturulmuş ve her bir adımda bağımlı değişken tahmin

performansı değerlendirilmiştir. Model performansı düşene kadar yeni GCM'ler eklenmiştir.

9. En başarılı MME belirlendikten sonra, iki farklı senaryo (SSP2-4.5 ve SSP5-8.5) için gelecek projeksiyonları gerçekleştirilmiştir.
10. Gözlemlenen değerler ve iki senaryo için elde edilen projeksiyon sonuçları kullanılarak, PET, SPI ve SPEI değerleri hesaplanmıştır.
11. Yağış, sıcaklık, PET, SPI ve SPEI değerlerinin geçmişteki ve iki farklı senaryoya göre gelecekteki olası değişimleri hem zamansal hem de mekânsal açıdan değerlendirilmiştir.





Şekil 3. 7. Çalışmaya ait uygulamanın akış diyagramı

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

### 4.1. Atmosferik Değişkenlerin Seçimi

Çalışmanın bu aşamasında, bölgedeki 28 meteorolojik istasyonun yağış ve sıcaklık verilerinin tahmin edilmesi için kurulan Yapay Sinir Ağı (YSA) modellemelerine girecek atmosferik değişkenlerin belirlenmesi değerlendirilecektir. Bu amaçla, her bir meteorolojik istasyonun yağış ve sıcaklık değerlerini ayrı ayrı açıklayabilen atmosferik bağımsız değişkenlerin seçimi, Materyal ve Yöntem bölümünde açıklanan korelasyon katsayısı kullanılarak yapılmıştır. Bu yaklaşım ile, yağış ve sıcaklıkla yüksek korelasyon gösteren atmosferik değişkenler YSA tabanlı istatistiksel ölçek indirgemedede girdi olarak kullanılacaktır.

#### 4.1.1. Yağış

Çalışmada, 1979-2015 yılları arasında 28 meteorolojik istasyonda gözlemlenmiş aylık ortalama toplam yağış verilerini tahmin etmek için kurulan YSA tabanlı istatistiksel ölçek indirgeme modeline tahminleyici olarak girecek atmosferik değişkenler, Çizelge 4.1.'de sunulmuştur. Bu çalışmada, YSA tabanlı modellemeye giren tahminleyici değişkenlerin sayılarının istasyondan istasyona farklılık gösterdiği görülmektedir. Çizelge 4.1'e göre, istasyon temelinde yağış ile en yüksek korelasyona sahip atmosferik değişkenlerin genellikle 850 hPA basınç seviyesindeki bağıl nem, yağış ve deniz seviyesine göre basınç olduğu belirlenmiştir. Bazı istasyonlarda ise, bu değişkenlere ek olarak yüzeye yakın sıcaklık ve 850 hPA basınç seviyesindeki sıcaklık değişkenleri de tahminleyici olarak modele dahil olmuştur. Kurulan YSA modellemelerine, 200 ve 300 hPA seviyelerindeki bağıl nem ve tüm basınç seviyelerindeki jeopotansiyel yükseklik değişkenleri tahminleyici olarak hiçbir istasyonda seçilmedikleri görülmektedir. Bu durum, meteorolojik verilerin tahmininde kullanılan atmosferik değişkenlerin seçiminin, yerel iklim dinamikleri ve istasyonun coğrafi konumuna göre değişebileceğini göstermektedir.

Çizelge 4. 1. Yağış için istasyon bazlı baskın tahminleyiciler

İst. No	Atmosferik Değişkenler																			
	Bgln 200	Bgln 300	Bgln 500	Bgln 700	Bgln 850	Dnz Bsnc	Jeo 200	Jeo 300	Jeo 500	Jeo 700	Jeo 850	Sckl 200	Sckl 300	Sckl 500	Sckl 700	Sckl 850	Yğş	Bsnc	Yzy scklk	
17240			✓		✓		✓													
17255																✓	✓			✓
17300					✓	✓											✓			
17310					✓	✓										✓	✓			
17320					✓	✓											✓			
17330					✓												✓			
17340					✓	✓														
17351					✓															✓
17370						✓										✓	✓	✓		✓
17372															✓	✓	✓			✓
17375					✓	✓											✓			
17380					✓	✓										✓	✓	✓		
17866												✓	✓							
17882					✓											✓				✓
17898					✓	✓										✓				✓
17908			✓				✓							✓						
17926					✓															
17936					✓															
17952					✓															
17956					✓	✓										✓	✓			✓
17958					✓	✓											✓			
17960					✓															✓
17962						✓												✓		
17970					✓	✓											✓	✓		
17974					✓	✓											✓	✓		
17979					✓	✓										✓		✓		✓
17981					✓	✓												✓		✓
17986						✓												✓		✓

**Bgln:** Bağıl nem    **Dnz-Bsnc:** Deniz seviyesine göre basınç    **Jeo:** Jeopotansiyel Yükseklik    **Sckl:** Sıcaklık    **Yzyscklk :** Yüzeye yakın sıcaklık ; **Yğş:** Yağış ; **Bsnc:** :Normal Basınç    (**Not:** Değişkenlerin yanındaki sayılar bulunduğu basınç seviyesini hPA cinsinden ifade etmektedir.)

#### 4.1.2. Sıcaklık

Çalışmanın bu bölümünde, 1979-2015 yılları arası 28 meteorolojik istasyonda gözlemlenmiş aylık ortalama sıcaklık verilerini tahmin etmek için kurulan YSA tabanlı istatistiksel ölçek indirgeme modeline tahminleyici olarak giren atmosferik değişkenlerin istasyon bazlı listesi Çizelge 4.2.'de görülmektedir. Çizelgeye göre, istasyon temelinde sıcaklık verileri ile en yüksek korelasyona sahip atmosferik değişkenler; yüzeye yakın sıcaklık ve 500, 700, 850 hPA basınç seviyelerindeki sıcaklık olduğu görülmektedir. Ayrıca bazı istasyonlarda, bu değişkenlere ilaveten 300 hPA basınç seviyesindeki jeopotansiyel değişkeni de tahminleyici olarak modele dahil olmuştur. Çalışmada, tüm basınç seviyelerindeki bağıl nem, yağış, deniz seviyesine göre basınç, normal basınç, 200 ve 300 hPA basınç seviyelerindeki jeopotansiyel yükseklik ve sıcaklık değişkenleri hiçbir istasyonda tahminleyici olarak modellere dahil olmadıkları görülmektedir. Sıcaklık parametresinin tahmin için modellere tahminleyici olarak giren değişkenlerin çeşitliliği, yağış parametresinin tahmini için kullanılan tahminleyicilere kıyasla daha azdır. Meteorolojik istasyonların coğrafi konumlarına ve yerel iklim dinamiklerine bağlı olarak sıcaklık tahminlerindeki modellemelere tahminleyici olarak giren atmosferik değişkenler farklılık göstermiştir. Ayrıca yağış ve sıcaklıkla ilişki gösteren atmosferik değişkenlerinde farklı olduğu görülmektedir.

Çizelge 4. 2. Sıcaklık için istasyon bazlı baskın tahminleyiciler

İst. No	Atmosferik Değişkenler																		
	Bgln 200	Bgln 300	Bgln 500	Bgln 700	Bgln 850	Dnz Bsnç	Jeo 200	Jeo 300	Jeo 500	Jeo 700	Jeo 850	Sckl 200	Sckl 300	Sckl 500	Sckl 700	Sckl 850	Yğış	Bsnç	Yzy scklk
17240														✓	✓	✓			✓
17255								✓						✓	✓	✓			✓
17300														✓	✓				✓
17310							✓	✓						✓	✓				✓
17320							✓	✓						✓	✓				✓
17330														✓	✓				✓
17340														✓	✓				✓
17351														✓		✓			✓
17370								✓	✓					✓	✓	✓			✓
17372								✓						✓	✓	✓			✓
17375														✓					✓
17380								✓						✓	✓				✓
17866														✓	✓	✓			✓
17882														✓	✓	✓			✓
17898														✓	✓	✓			✓
17908														✓		✓			✓
17926								✓						✓	✓	✓			✓
17936														✓		✓			✓
17952								✓						✓	✓	✓			✓
17956														✓	✓	✓			✓
17958														✓	✓				✓
17960														✓	✓	✓			✓
17962								✓						✓	✓	✓			✓
17970								✓						✓	✓	✓			✓
17974							✓	✓						✓	✓				✓
17979								✓	✓					✓	✓	✓			✓
17981														✓	✓				✓
17986														✓	✓	✓			✓

**Bgln:** Bağıl nem    **Dnz-Bsnç:** Deniz seviyesine göre basınç    **Jeo:** Jeopotansiyel Yükseklik    **Sckl:** Sıcaklık    **Yzyscklk :** Yüzeye yakın sıcaklık ; **Yğış:** Yağış ; **Bsnç:** :Normal Basınç    (**Not:** Değişkenlerin yanındaki sayılar bulunduğu basınç seviyesini hPA cinsinden ifade etmektedir.)

## 4.2. GCM'lerin Performans Değerlendirmesi

### 4.2.1. Yağış

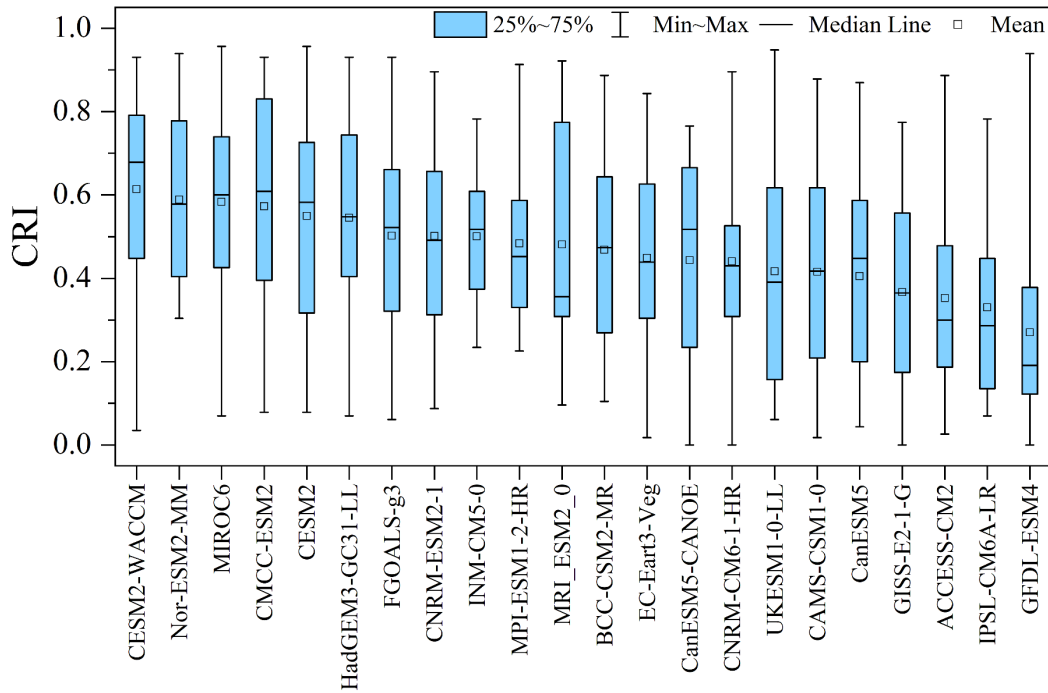
Bu bölümde, Akdeniz Bölgesi'ndeki geçmiş dönemde gözlemlenen aylık toplam yağış verileri ile CMIP6 modellerinin tarihsel çıktıları ile yapılan yağış simülasyonlarının uyumluluğu değerlendirilmektedir. Çizelge 4.3.'te 22 farklı CMIP6 modeli ile tahmin edilen yağış değerlerinin tarihi gözlem verileri ile uyumunu belirlemek için beş performans kriterine ait sonuçlar yer almaktadır. Çizelgede yer alan sonuçlar, 28 istasyon için elde edilen her bir performans kriterinin bölgedeki aritmetik ortalamasını ifade etmektedir.

Sonuçlara göre, GCM'lerin tarihi yağış verilerini tahmin etme performanslarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Örneğin, NSE, nRMSE, KGE ve CC değerine göre en başarılı modelin MIROC6 olduğu, md değerine göre ise CESM2-WACCM modelinin olduğu görülmektedir. Tüm performans kriterlerine göre yapılan değerlendirmeye bakıldığında başarı düzeyi en düşük modelin GFDL-ESM4 olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4. 3. CMIP6 modellerinin performans kriterlerine göre yağışı tahmin etme becerileri

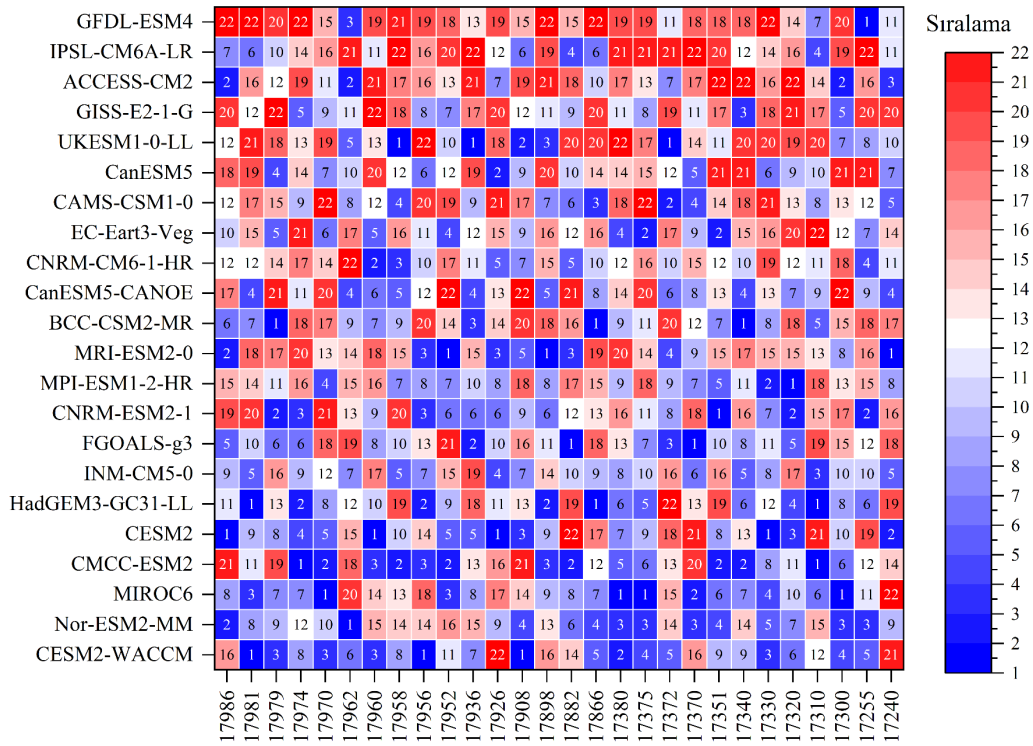
CMIP6 Model	NSE	NRMSE	KGE	md	CC
ACCESS-CM2	0.371	0.159	0.491	0.595	0.614
BCC-CSM2-MR	0.384	0.157	0.500	0.602	0.623
CAMS-CSM1-0	0.382	0.157	0.477	0.593	0.619
CanESM5	0.375	0.158	0.499	0.600	0.617
CanESM5-CANOE	0.375	0.158	0.499	0.600	0.618
<b>CESM2</b>	<b>0.399</b>	<b>0.155</b>	<b>0.517</b>	<b>0.603</b>	<b>0.636</b>
<b>CESM2-WACCM</b>	<b>0.396</b>	<b>0.156</b>	<b>0.512</b>	<b>0.610</b>	<b>0.632</b>
<b>CMCC-ESM2</b>	<b>0.403</b>	<b>0.154</b>	<b>0.500</b>	<b>0.602</b>	<b>0.635</b>
CNRM-CM6-1-HR	0.381	0.157	0.490	0.597	0.622
CNRM-ESM2-1	0.388	0.157	0.495	0.597	0.625
EC-Eart3-Veg	0.380	0.158	0.498	0.599	0.620
FGOALS-g3	0.388	0.157	0.499	0.602	0.625
GFDL-ESM4	0.356	0.161	0.474	0.589	0.603
GISS-E2-1-G	0.367	0.159	0.497	0.601	0.612
<b>HadGEM3-GC31-LL</b>	<b>0.392</b>	<b>0.156</b>	<b>0.508</b>	<b>0.604</b>	<b>0.628</b>
INM-CM5-0	0.389	0.156	0.489	0.599	0.627
IPSL-CM6A-LR	0.364	0.160	0.483	0.601	0.607
<b>MIROC6</b>	<b>0.404</b>	<b>0.154</b>	<b>0.520</b>	<b>0.608</b>	<b>0.637</b>
MPI-ESM1-2-HR	0.391	0.156	0.490	0.597	0.628
MRI-ESM2-0	0.378	0.158	0.508	0.604	0.621
<b>Nor-ESM2-MM</b>	<b>0.389</b>	<b>0.157</b>	<b>0.510</b>	<b>0.610</b>	<b>0.627</b>
UKESM1-0-LL	0.372	0.159	0.515	0.603	0.619

Çalışmada, model ve istasyon bazında yapılan performans değerlendirmelerine bakıldığında, modellerin başarılarının değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Bu nedenle, tüm performans kriterlerini birlikte değerlendiren herhangi bir ortak değerlendirme kriterine göre değerlendirme yapılmadan bir GCM'nin net başarısını ortaya koymak zordur. Bu amaçla, tüm performans kriterlerini bir arada değerlendiren CRI performans kriteri kullanılarak GCM'lerin istasyon bazlı değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışmada, her GCM için ortalama CRI değerlerini gösteren bir kutu grafiği Şekil 4.1'de verilmiştir. CRI performans kriterine göre yapılan değerlendirmede, bölgenin tarihi yağış verilerini tahmin etmede en başarılı GCM'nin CESM2-WACCM olduğu, en başarısızın ise GFDL-ESM4 olduğu görülmektedir.



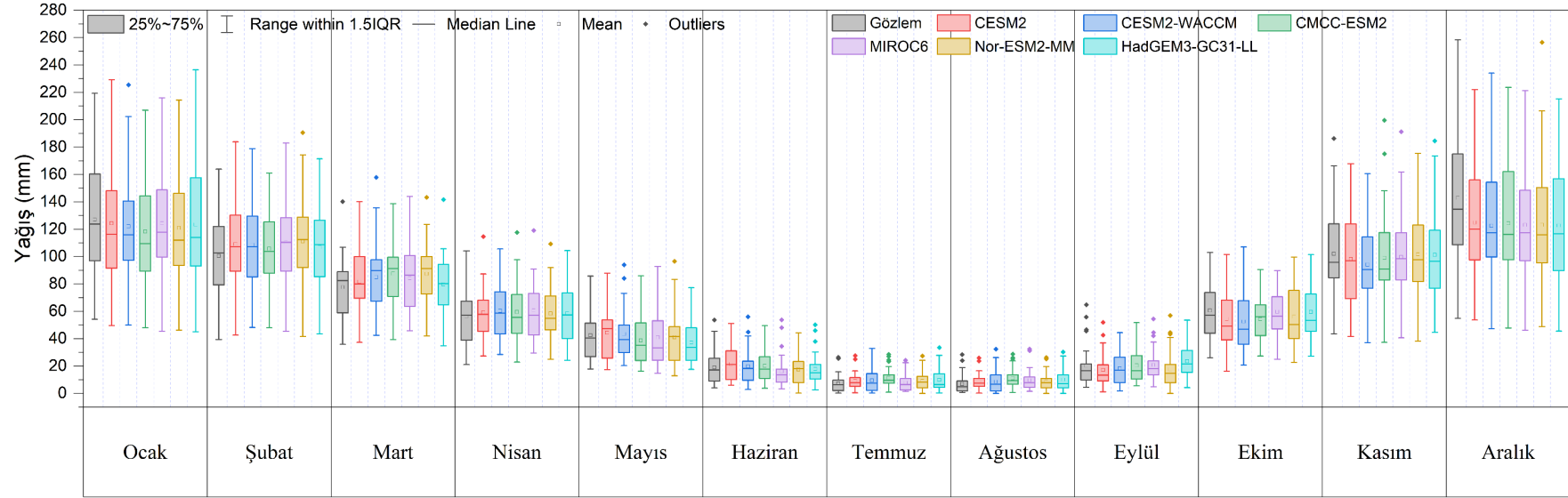
Şekil 4. 1. Yağış için CRI kriterine göre GCM'lerin performans değerlendirilmesi

GCM'lerin CRI metriğine göre istasyon bazlı performans değerlendirilmesi modellerin bölgesel başarısını görme açısından önemlidir. Her modelin her istasyonda başarı sırasını gösteren ısı haritası grafiği, Şekil 4.2'da yer almaktadır. Bu grafikte, en başarılı modelin sıralaması 1, en başarısız modelin sıralaması 22 olarak gösterilmiştir. CRI değerlerine göre yapılan sıralamalarda; CESM2-WACCM, Nor-ESM2-MM, MIROC6, CMCC-ESM2, CESM2 ve HadGEM3-GC31-LL modellerinin genel olarak bölgenin tarihi yağış verilerini tahmin etmede en başarılı GCM'ler olarak ön plana çıkmaktadır. Ancak, CESM2-WACCM modelinin yüksek rakımlı 17240-Isparta ve 17926-Korkuteli istasyonlarında düşük performans gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4. 2. Yağış için hesaplanan CRI değerlerine göre GCM'lerin istasyon bazlı sıralaması

Çalışmada GCM'lerin aylık toplam yağışı simüle etme becerilerine ilişkin önemli bulgular da ortaya çıkmıştır. Tarihi dönem gözlemlenmiş aylık ortalama toplam yağış verileri ile en iyi performans gösteren GCM'ler tarafından simüle edilmiş aylık yağış verileri Şekil 4.3 verilmiştir. Şekil incelendiğinde, GCM'lerin ekim, kasım, aralık ve ocak aylarındaki tahmini yağış verilerini, gözlem verilerinin ortalamasına göre biraz düşük tahmin ettiği görülmüştür. Bununla birlikte şubat, mart ve nisan aylarında ise tahmin verilerinin gözlem verilerine göre büyük farklar olmamakla birlikte biraz daha yüksek tahmin edildiği görülmektedir. Yine aynı GCM'ler tarafından mayıs, haziran, temmuz, ağustos ve eylül ayları için yapılan tahminlerin gözlem veri ortalamalarına yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular, GCM'lerin bölgedeki yağış dinamiklerini simüle etme kabiliyetlerinin mevsimsel değişkenlik gösterdiğini ve bu modellerin bölgesel iklim özelliklerini yansıtmada konusunda farklı başarı seviyelerine sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. 3. En başarılı 6 GCM'nin aylık yağışları simüle etme becerilerinin değerlendirilmesi

#### 4.2.2. Sıcaklık

Bu bölümde, Akdeniz Bölgesi'ndeki meteorolojik istasyonlarda tarihi dönemde gözlemlenen aylık ortalama sıcaklık verileri ile CMIP6 modellerinin tarihsel çıktıları ile yapılan sıcaklık simülasyonlarının uyumluluğu değerlendirilmektedir. Yağış verileri için oluşturulan modelleme sistemi, sıcaklık için de aynı şekilde uygulanmıştır. Çizelge 4.4.'te 22 farklı CMIP6 modeli ile tahmin edilen sıcaklık değerlerinin tarihi gözlem verileri ile uyumu, beş performans kriterine göre yapılan değerlendirme sonuçları yer almaktadır. GCM'lerin tarihi gözlem verilerini simüle etme performanslarının sonuçlarına bakıldığında, GCM'lerin tarihi dönem aylık ortalama sıcaklıkları tahmin etmede oldukça başarılı oldukları görülmektedir. Burada, NSE, KGE, MD ve CC değerleri 1'e yakın, nRMSE ise 0'a yakındır.. Özellikle NSE değeri 0,93-0,96 aralığındadır. Tüm performans kriterlerine göre en başarılı GCM'nin INM-CM5-0 modeli olduğu görülmektedir. Aynı zamanda en düşük performansı gösteren model ise IPSL-CM6A-LR olarak tespit edilmiştir.

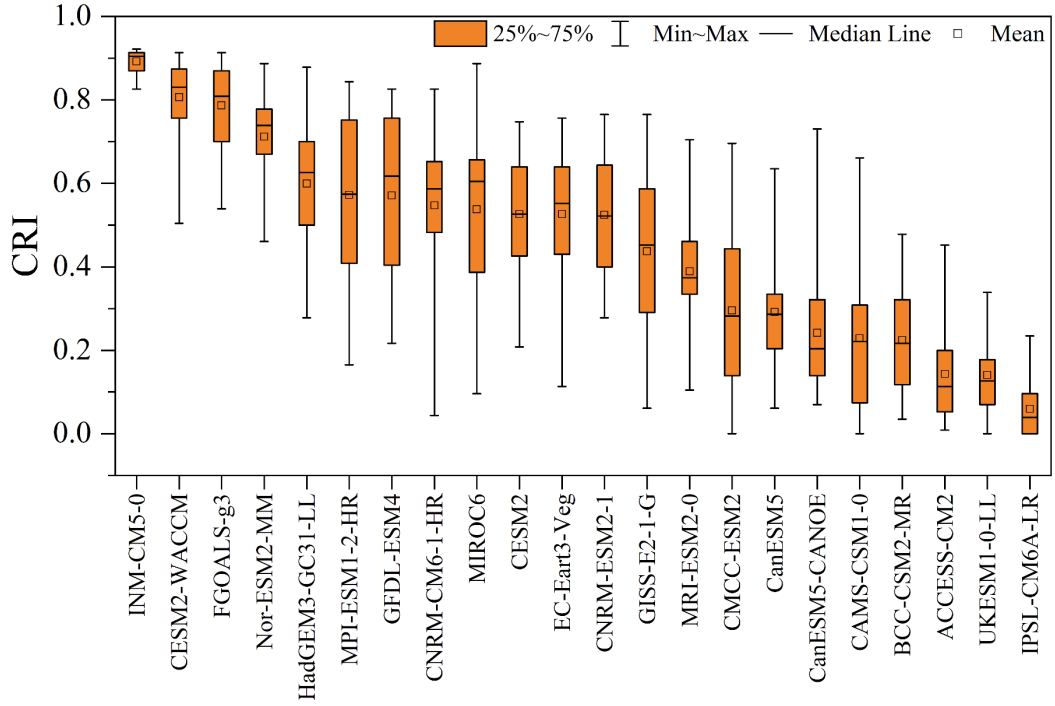
Çizelge 4. 4. CMIP6 modellerinin performans kriterlerine göre sıcaklığı tahmin etme becerileri

CMIP6 Models	NSE	NRMSE	KGE	md	CC
ACCESS-CM2	0.936	0.075	0.8909	0.8909	0.973
BCC-CSM2-MR	0.940	0.073	0.8923	0.8923	0.975
CAMS-CSM1-0	0.939	0.074	0.8919	0.8919	0.974
CanESM5	0.942	0.072	0.8920	0.8920	0.976
CanESM5-CANOE	0.941	0.072	0.8907	0.8907	0.975
CESM2	0.946	0.069	0.8968	0.8968	0.978
<b>CESM2-WACCM</b>	<b>0.953</b>	<b>0.064</b>	<b>0.9038</b>	<b>0.9038</b>	<b>0.981</b>
CMCC-ESM2	0.941	0.072	0.8926	0.8926	0.975
CNRM-CM6-1-HR	0.946	0.069	0.8984	0.8984	0.978
CNRM-ESM2-1	0.946	0.069	0.8970	0.8970	0.978
EC-Eart3-Veg	0.947	0.069	0.8969	0.8969	0.978
<b>FGOALS-g3</b>	<b>0.953</b>	<b>0.065</b>	<b>0.9034</b>	<b>0.9034</b>	<b>0.981</b>
GFDL-ESM4	0.947	0.068	0.8986	0.8986	0.978
GISS-E2-1-G	0.944	0.070	0.8956	0.8956	0.977
HadGEM3-GC31-LL	0.948	0.067	0.8994	0.8994	0.979
<b>INM4-CM5-0</b>	<b>0.957</b>	<b>0.062</b>	<b>0.9080</b>	<b>0.9080</b>	<b>0.983</b>
IPSL-CM6A-LR	0.932	0.077	0.8867	0.8867	0.971
MIROC6	0.946	0.069	0.8987	0.8987	0.978
MPI-ESM1-2-HR	0.948	0.068	0.8990	0.8990	0.978
MRI-ESM2-0	0.944	0.070	0.8971	0.8971	0.976
<b>Nor-ESM2-MM</b>	<b>0.951</b>	<b>0.066</b>	<b>0.9025</b>	<b>0.9025</b>	<b>0.980</b>
UKESM1-0-LL	0.938	0.074	0.8894	0.8894	0.974

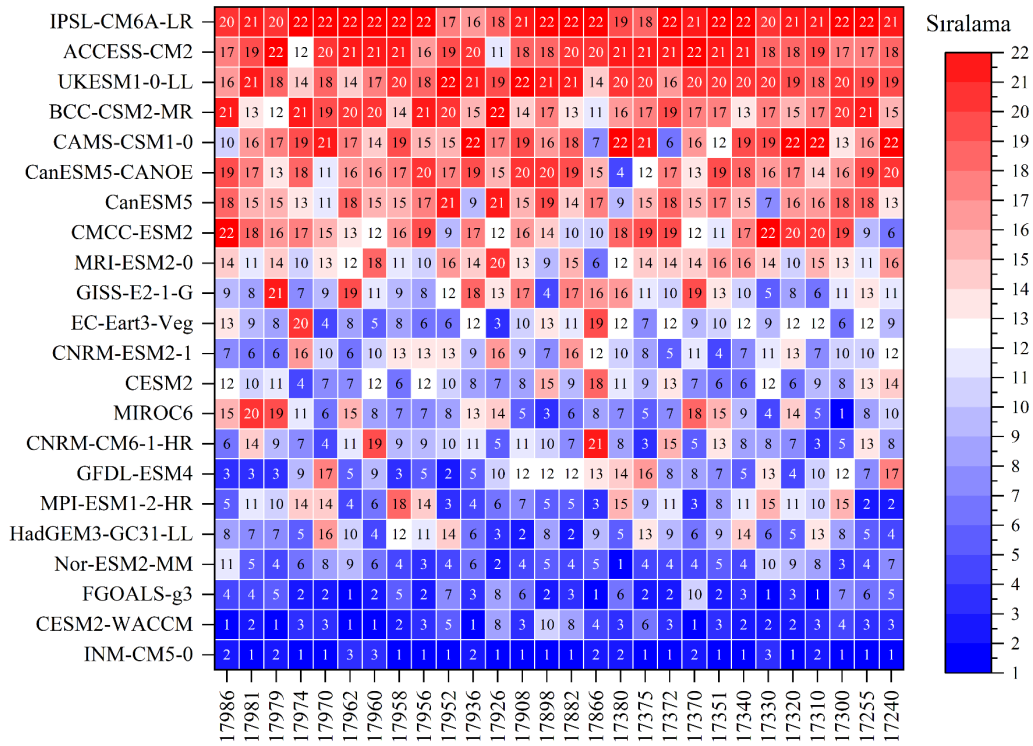
\*En başarılı model

GCM'lerin model ve istasyon bazında performans değerlendirmeleri incelendiğinde, yağış verisinde olduğu gibi, model başarılarının değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Bu nedenle, tüm performans kriterlerini birlikte kapsamlı bir şekilde değerlendirme imkânı sunan CRI performans kriteri sıcaklık verileri için de uygulanmıştır. Bu kapsamda her bir GCM'nin, 28 istasyondaki CRI değerlerini gösteren kutu grafiği Şekil 4.4'te verilmiştir. Şekil 4.4'e göre, sıcaklık simülasyonunda bölgeyi en iyi temsil eden model, bireysel performans kriterlerine göre de en başarılı olan INM4-CM5-0 modelidir. Ayrıca, her bir istasyonda modellerin başarı sırasını gösteren ısı haritası grafiği, Şekil 4.5'te verilmiştir. CRI değerine göre yapılan sıralamada, INM4-CM5-0, CESM2-WACCM, FGOALS-g3, Nor-ESM2-MM

modelleri tarihsel sıcaklıkları tahmin etmede diğer modellere göre daha başarılı oldukları görülmektedir. Ayrıca ilk dört GCM'nin tüm bölgedeki istasyonlarda başarı düzeyi genel olarak yüksek olmuştur.

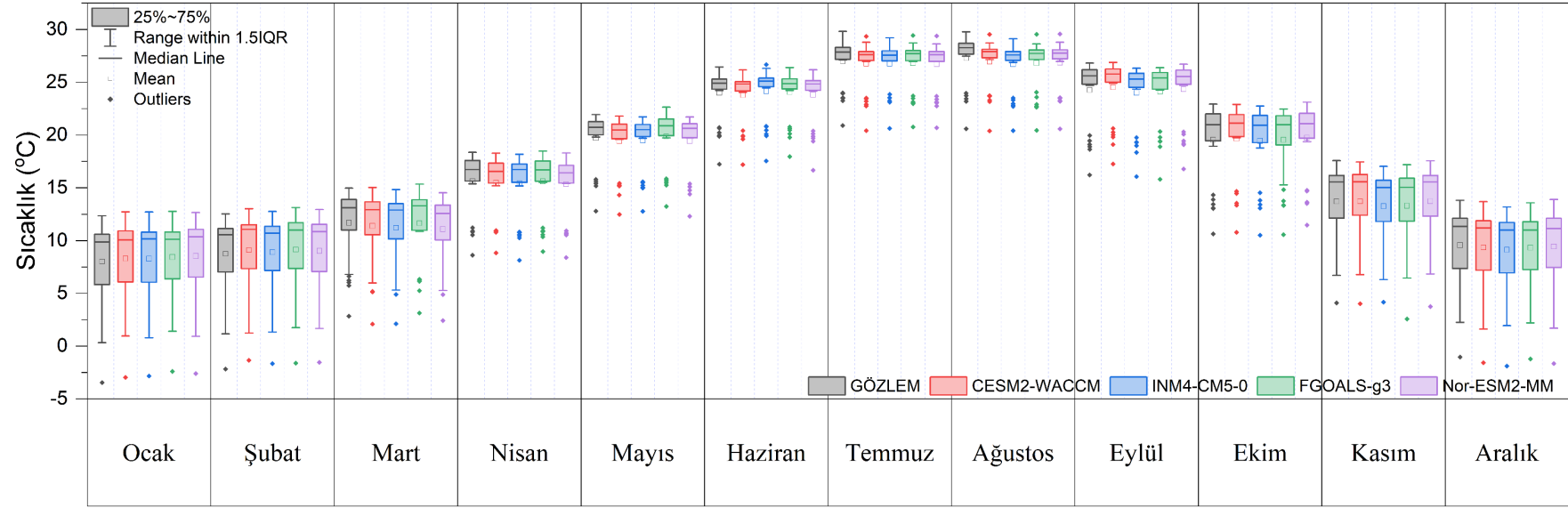


Şekil 4. 4. Sıcaklık için CRI kriterine göre GCM'lerin performans değerlendirilmesi



Şekil 4. 5. Sıcaklık için hesaplanan CRI değerlerine göre GCM'lerin istasyon bazlı sıralaması

Çalışmada, en iyi performans gösteren GCM'lerin tarihi dönem aylık ortalama sıcaklık verilerini tahmin etme becerilerine bakıldığında yine en iyi dört modelin başarısının oldukça yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4.6). Şekil incelendiğinde, Özellikle, sıcak yaz aylarındaki sıcaklıkların tahmin performansı yüksek olup, gözlem verilerine daha yakın tahminler yapıldığı görülmektedir. Diğer aylarda ise tahmin performansları değişkenlik göstermektedir. Bu sonuçlar, GCM'lerin bölgesel iklim özelliklerini simüle etme kabiliyetlerinin mevsimsel değişkenlik gösterdiğini ve bu modellerin bölgesel sıcaklık dinamiklerini yansıtmada konusunda farklı başarı seviyelerine sahip olduğunu göstermektedir.



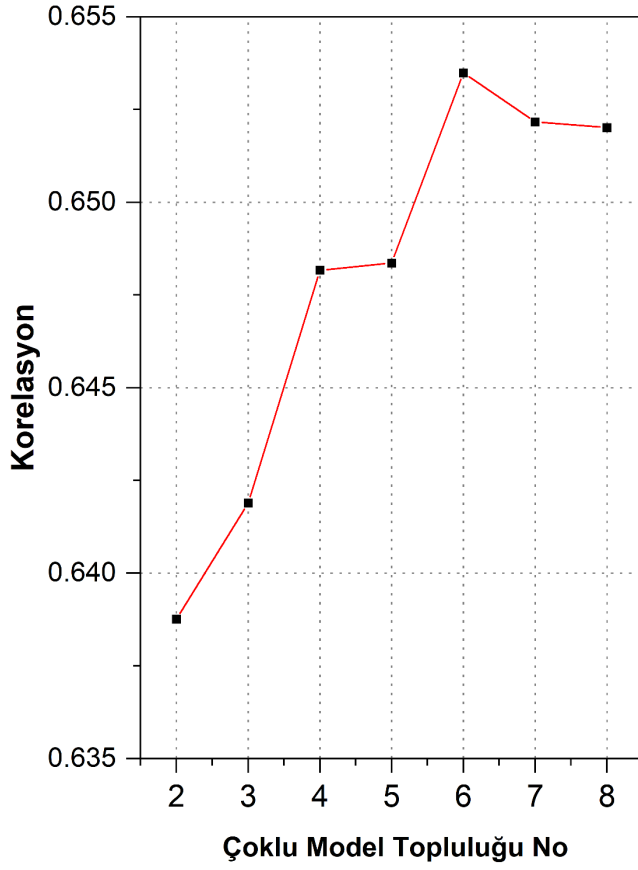
Şekil 4.6. En başarılı dört GCM'nin aylık ortalama sıcaklıkları simüle etme becerilerinin değerlendirilmesi

### 4.3. MME'lerin Performans Değerlendirmesi

#### 4.3.1. Yağış

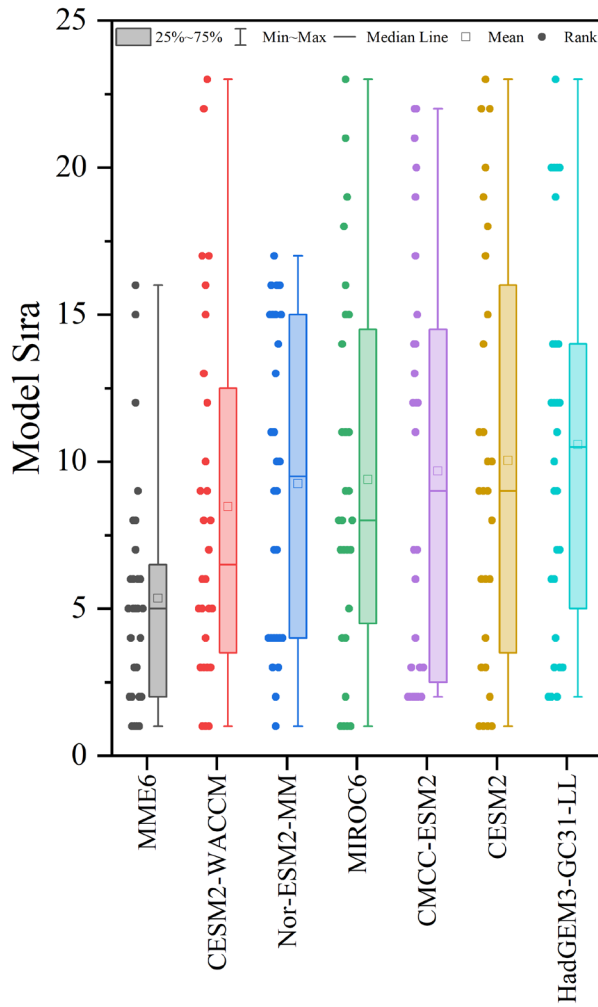
Bu bölümde, bölüm 4.2.1.'de yağış için belirlenen en başarılı GCM'lerden oluşturulan MME modelinin belirlenmesi ve bu MME modelinin meteorolojik gözlem istasyonlarında gözlemlenen tarihi aylık toplam yağış verilerini tahmin etme becerisi değerlendirilmektedir. GCM'lerin bölgedeki performanslarının istasyondan istasyona değişkenlik gösterdiği görülmüş, bu nedenle tek bir GCM kullanımı veya tüm GCM'lerin basit ortalamalarının alınması, projeksiyon güvenilirliğini azaltabileceği kanaati oluşmuştur. Bu kısıtlamaları aşmak amacıyla çalışmada, bölgeyi en iyi temsil eden optimum sayıda GCM'ler ile MME oluşturulmuştur. Literatürdeki yaklaşımlar göz önünde bulundurularak, en başarılı 3 ila 10 arası modelin kullanımı tercih edilmiştir (Ahmed ve ark., 2019a). Bu çerçevede, Iqbal ve ark. (2020) çalışmasında kullanılan yaklaşım benimsenerek, CRI değerlerine göre en iyi performans gösteren GCM'lerin farklı kombinasyonları kullanılarak MME'ler oluşturulmuştur.

Çalışmada, farklı sayıda GCM kullanılarak oluşturulan her bir MME'nin, simüle ettiği yağış verileri ile istasyonda ölçülmüş gözlem verileri arasındaki ortalama korelasyon katsayısının değişimi, Şekil 4.7'de verilmiştir. Bu inceleme sonucunda, altıncı modele kadar her yeni eklenen GCM'nin, MME'lerin tahmin performansını iyileştirdiği, ancak altıncı modelden sonra eklenen GCM'lerin korelasyon katsayısını düşürdüğü görülmüştür. Bu nedenle, en başarılı ilk altı GCM ile oluşturulan MME'nin bölgeyi en iyi temsil ettiği görülmektedir. Yağış için oluşturulan MME modeli artık MME6 diye anılacaktır.



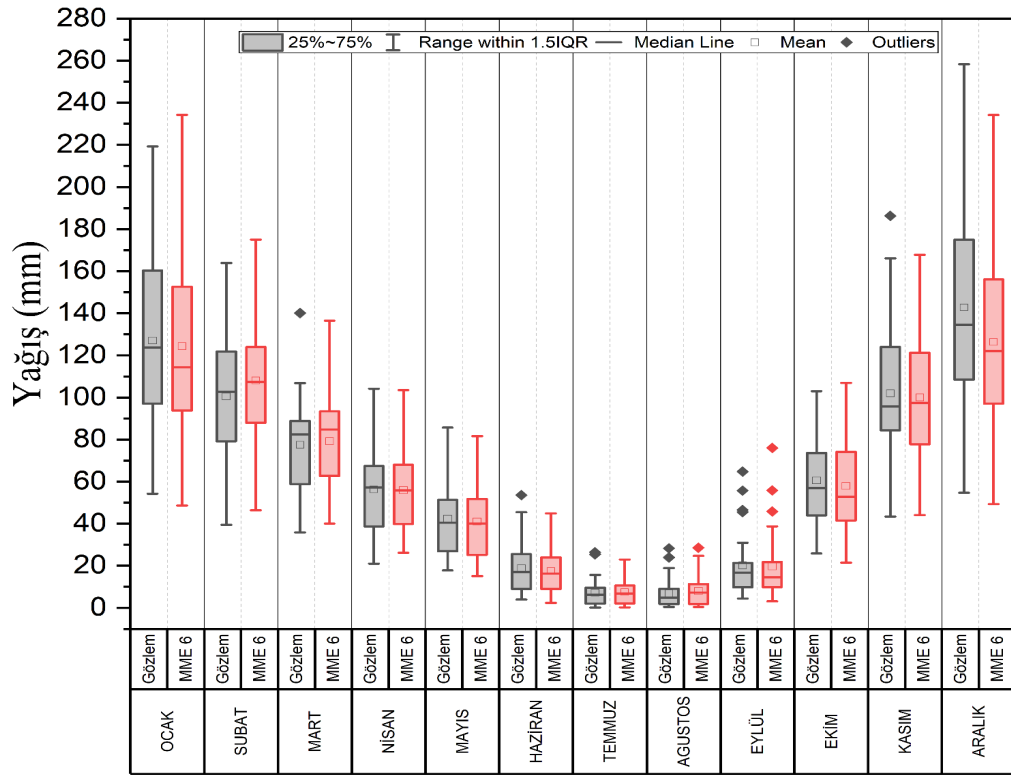
Şekil 4. 7. Gözlem ve MME'lere ait ortalama yağış verileri arasındaki korelasyon

Bölgede yağış için oluşturulan MME6 ve en iyi performans gösteren ilk altı GCM'nın başarı sıralaması Şekil 4.8'de verilmiştir Yağış için oluşturulan MME6'nın bölgenin tarihi yağış verilerini simüle etme becerisinin, bölgede en iyi performans gösteren GCM'lerden daha iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 8. Yağış için ilk altı GCM ve MME'nin CRI sıralaması

Yağış için oluşturulan MME6 modeli ile tahmin edilmiş aylık ortalama toplam yağış verileri, istasyonların gözlenmiş ortalama yağış verileri ile birlikte Şekil 4.9'da bir arada verilmiştir. Şekil incelendiğinde, önceki bölümlerde değerlendirilmesi yapılan bireysel GCM'lerin aylık bazdaki tahminlerine göre, MME6 modelinin özellikle mart, nisan, mayıs, eylül, olmak üzere tüm aylarındaki gözlem ile tahmin edilen yağış değerlerini birbirine yaklaştırdığı görülmektedir. Örneğin aralık ayı gözlem verilerine göre bölgede ortalama 142 mm yağış gözlemlenirken, MME6 tarafından tahmin edilen değer bölge ortalaması 126 mm'dir, oysa bireysel GCM'ler tarafından yapılan en iyi tahmin değeri 123 mm dir. MME6 modeli tarafından simüle edile yağış verilerinin gözlem verileri arasında ciddi farkların olmadığı görülmektedir.



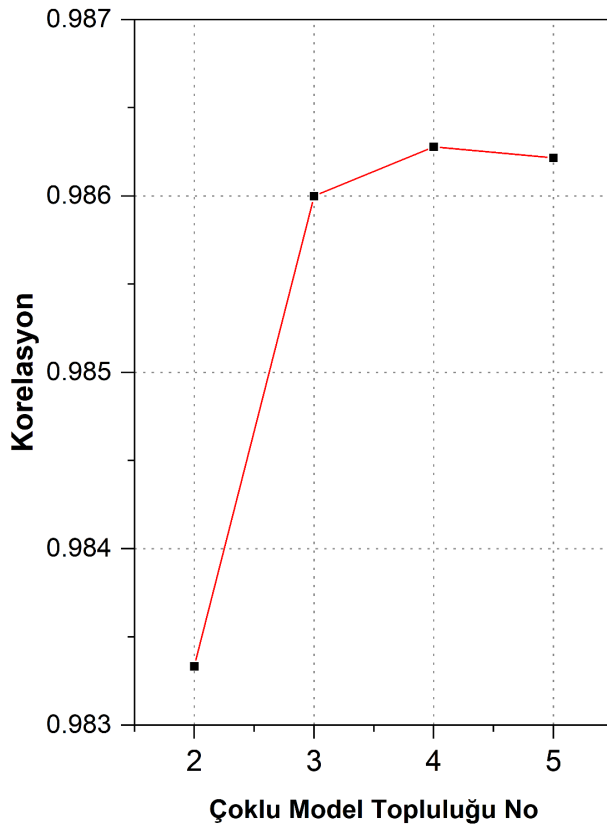
Şekil 4. 9. MME6'nın gözlemlenmiş aylık yağışı simüle etme beceresi

### 4.3.2. Sıcaklık

Bu bölümde, bölüm 4.2.2.'de sıcaklık için belirlenen en başarılı GCM'lerden oluşturulan MME modelinin belirlenmesi ve bu MME modelinin meteorolojik gözlem istasyonlarında gözlemlenen tarihi aylık ortalama sıcaklık verilerini tahmin etme becerisi değerlendirilmektedir.

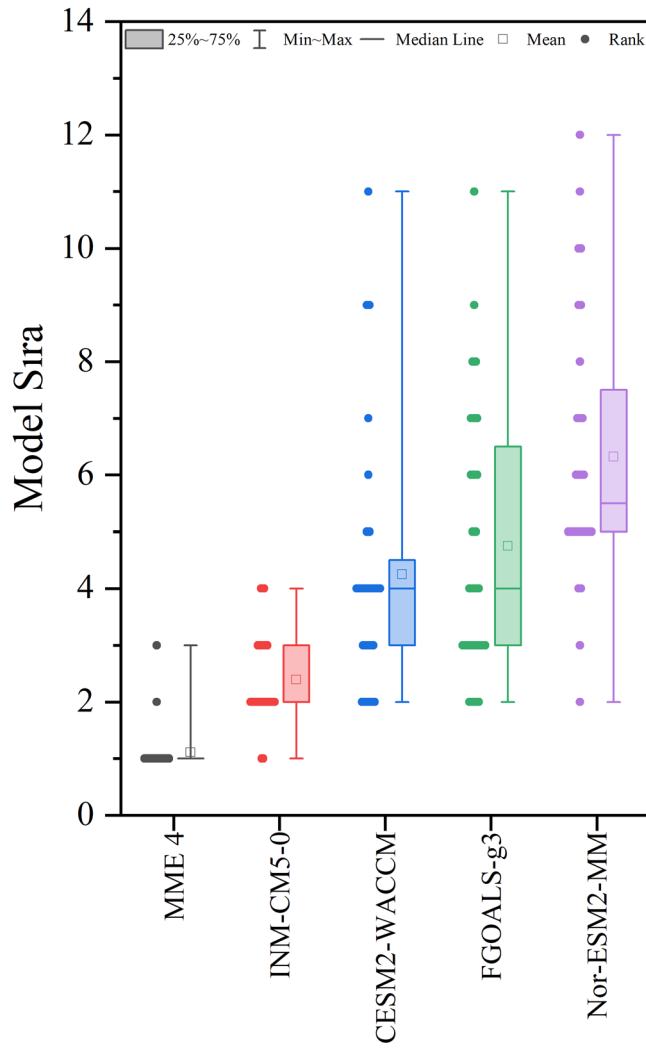
Çalışmada, CMIP6'ya ait GCM'lerin arasında INM-CM5-0 modelinin Akdeniz bölgesindeki aylık ortalama sıcaklıkları tahmin etmede yüksek bir başarı gösterdiği belirlenmiştir. Ancak, bazı istasyonlarda bu modelin başarı sırasının değişkenlik gösterdiği önceki bölümlerde belirtilmiştir. Bu durumu göz önünde bulundurarak, yağış tahmininde olduğu gibi, korelasyon katsayısına dayalı olarak en başarılı GCM'lerden bir MME oluşturulmuştur.

Çalışmada, farklı sayıda GCM kullanılarak oluşturulan her bir MME'nin, simüle ettiği sıcaklık verileri ile istasyonda ölçülmüş gözlem sıcaklık verileri arasındaki ortalama korelasyon katsayısının değişimi, Şekil 4.10'de verilmiştir. Şekil 4.10 incelendiğinde, oluşturulan MME modellerine ait tahmin verileri ile gözlem verileri arasındaki korelasyonun, eklenen dördüncü GCM'ye kadar iyileştiği ancak dördüncü GCM'den sonra eklenen GCM'ler MME'nin tahmin performansını düşürdüğü görülmüştür. Bu sonuçlar ışığında, sıcaklık tahminleri için en iyi ilk dört GCM'nin ortalamasından oluşturulan MME'nin uygun olduğu görülmüştür. Sıcaklık için oluşturulan MME artık MME4 diye anılacaktır.



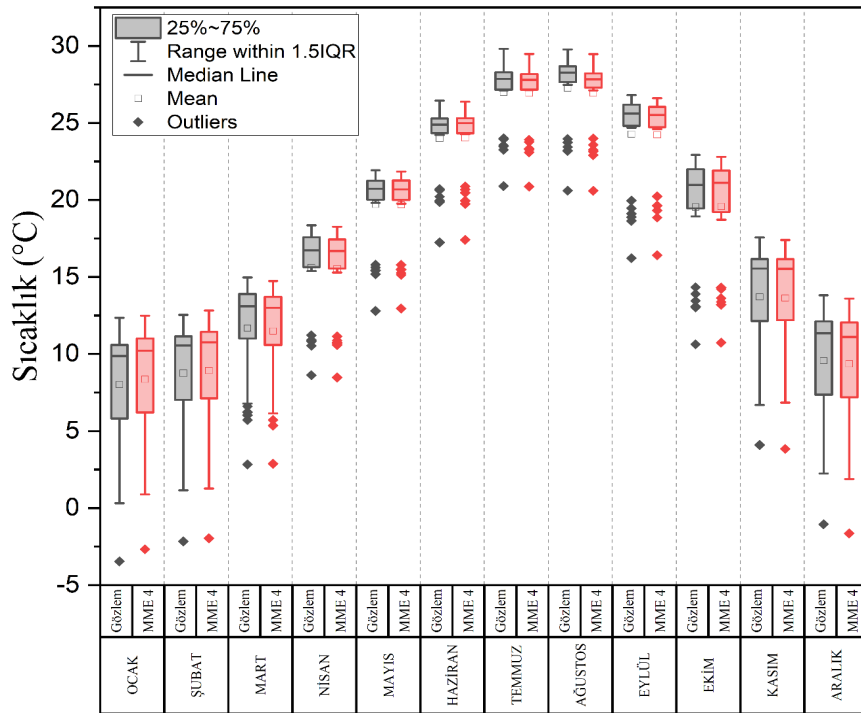
Şekil 4. 10. Gözlemlenmiş ve MME' lere ait ortalama sıcaklıklar verileri arasındaki korelasyon

MME4 ve en iyi performans gösteren ilk dört GCM'nin istasyon bazlı başarı sıralaması, Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Bu şekilde, oluşturulan MME4'nin, bölgedeki aylık ortalama sıcaklığı en iyi performans gösteren GCM'lerden daha iyi tahmin ettiği görülmektedir.



Şekil 4. 11. Sıcaklık için ilk dört GCM'nin ve MME'nin CRI sıralaması

Sıcaklık için oluşturulan MME6 modeli ile tahmin edilmiş aylık ortalama sıcaklık verileri, gözlemlenmiş ortalama sıcaklık verileri ile birlikte Şekil 4.12'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, MME'nin aylık gözlemlenmiş sıcaklık verilerini oldukça başarılı bir şekilde tahmin ettiği görülmektedir. MME4 tarafından tahmin edilen aylık ortalama sıcaklık verileri ile istasyonların gözlemlenmiş verileri arasında en büyük fark kış aylarında olup bu değer  $0.3^{\circ}\text{C}$  dir, fakat diğer aylarda bu fark  $0.1-0.3^{\circ}\text{C}$  arasında değişmektedir. Örneğin, bölgede ocak ayı ortalama sıcak değeri  $8.02^{\circ}\text{C}$  olarak kaydedilmişken, MME4 tarafından bölgenin ocak ayı sıcaklık ortalaması tahmini  $8.34^{\circ}\text{C}$  olarak tespit edilmiştir.



k

Şekil 4. 12. MME4'nın gözlemlenmiş aylık ortalama sıcaklığı simüle etme beceresi

#### 4.4. Gelecek Dönem Yağış ve Sıcaklık Verilerinin Değerlendirilmesi

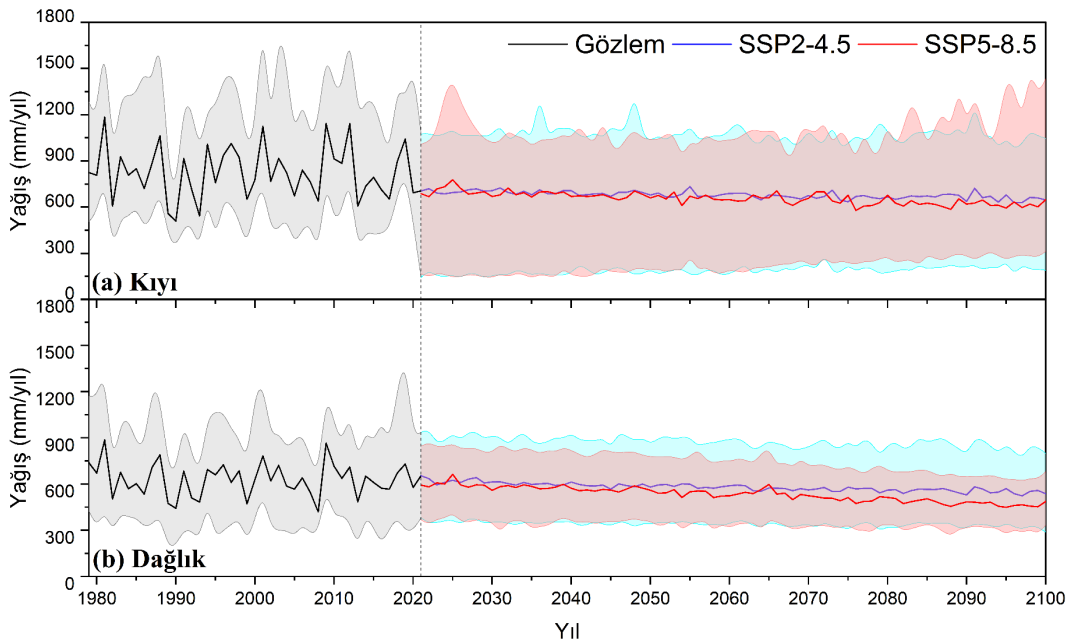
##### 4.4.1. Yağış verilerinin zamansal ve mekânsal değişimi

Bu bölümde, Akdeniz Bölgesi'nde 1979-2021 yılları arasında istasyon bazında ölçülen yağış verileri ve MME6 ile iki farklı senaryo (SSP2-4.5, SSP5,8.5) altında 2021-2100 yılları arası tahmin edilen yağışların zamansal değişimleri Şekil 4.13'te verilmiştir. Bu grafikte siyah, mavi ve kırmızı çizgiler, bölgedeki istasyonların ortalama yağış değerlerini temsil etmekte, aynı renklerdeki dolgular ise istasyonların maksimum ve minimum yağış değerlerini ifade etmektedir. Aynı zamanda bu dolgular, istasyonların yağış değişim aralığını göstermektedir. Şekil 4.13'teki yağış değişim grafiği, tarihsel ve projeksiyon ile hesaplanan değerlerin kıyı ve dağlık bölgeler arasında önemli farklar olduğunu ortaya koymaktadır.

Tarihsel dönemde kıyı bölgesinde ortalama yağış değeri 827 mm/yıl ve değişim aralığı 300-1600 mm/yıl iken, dağlık bölgede bu değerler sırasıyla 630 mm/yıl ve 250-

1250 mm/yıl olarak belirlenmiştir. Projeksiyonda, her iki bölgede de yağış miktarlarının azaldığı ve özellikle en kötümser senaryo olan SSP5-8.5'te bu düşüşün daha belirgin olduğu görülmektedir. Kıyı bölgesinde ortalama yağış miktarı SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryolarında sırasıyla 680 mm/yıl ve 650 mm/yıl'a düşerken, dağlık bölgede bu değerler SSP2-4.5 için 580 mm/yıl, SSP5-8.5 için ise 535 mm/yıl'a düşmektedir. Dağlık bölgede SSP5-8.5 senaryosuna göre yağış miktarındaki düşüş, SSP2-4.5 senaryosuna göre daha belirgin olup, değişim aralığı tüm istasyonlarda sınırlanmaktadır. Kıyı bölgesinde de benzer bir düşüş meydana gelse de en yüksek yağış değerindeki değişim iki senaryoda da sınırlı bir dönem dışında benzerdir. Ancak, kıyı bölgesindeki minimum yağış değerlerinin 150 mm/yıl'ın altına düşmesi dikkat çekicidir.

Bu bulgular, aynı coğrafi bölge olmalarına rağmen, kıyı ve dağlık bölgelerde meydana gelmesi muhtemel yağış değişimlerinin oldukça farklı olabileceğini göstermektedir.



Şekil 4. 13. Yağış değişiminin zamansal dağılımı a) Kıyı ve b) Dağlık bölge

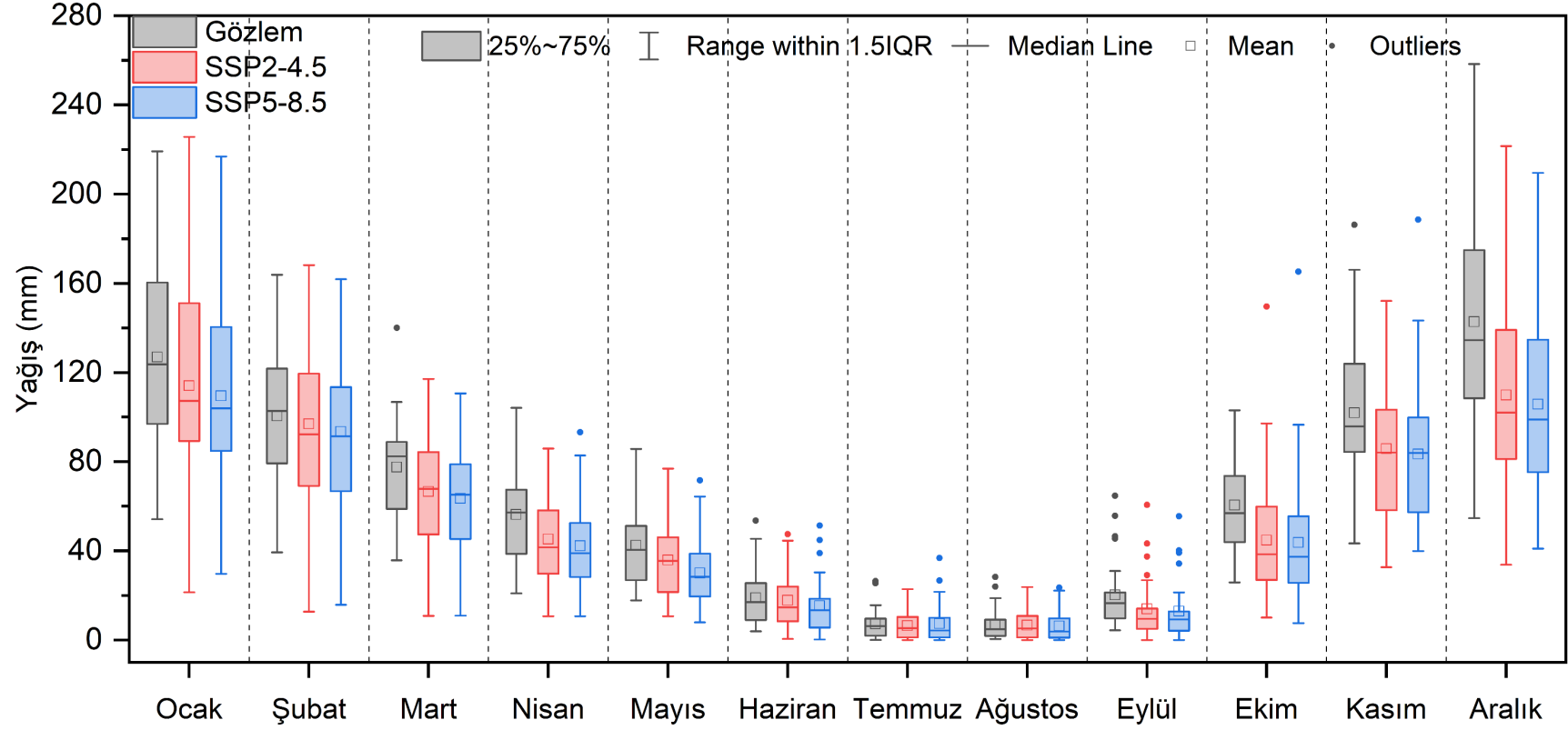
Genel olarak, Akdeniz Bölgesi'nde aylık gözlem verilerine dayanarak yapılan değerlendirmeler, her iki senaryo (SSP2-4.5 ve SSP5-8.5) altında tüm aylarda aylık

toplam yağış miktarlarında azalış olduğunu göstermektedir, bu durum Şekil 4.14'te görülmektedir. Aylık bazda yapılan değerlendirmede, özellikle kış ve sonbahar aylarında (aralık, ocak, kasım, ekim, eylül) gözlem verilerine göre diğer aylara kıyasla yağışlarda daha fazla düşüşler dikkat çekmektedir.

Örneğin, bölgenin en yağışlı ayı olan aralık ayında geçmişte bölgeye ortalama 142 mm yağış düşerken, SSP2-4.5 senaryosunda bu değer 109 mm'ye, SSP5-8.5 senaryosunda ise 105 mm'ye düşmüştür. Ocak ayındaki ortalama yağış miktarı 127 mm iken, SSP2-4.5 senaryosunda 114 mm'ye, SSP5-8.5 senaryosunda ise 109 mm'ye düşmüştür. Kasım ayında ortalama 102 mm olan yağış miktarı, SSP2-4.5 senaryosunda 86 mm'ye, SSP5-8.5 senaryosunda ise 82 mm'ye düşmektedir.

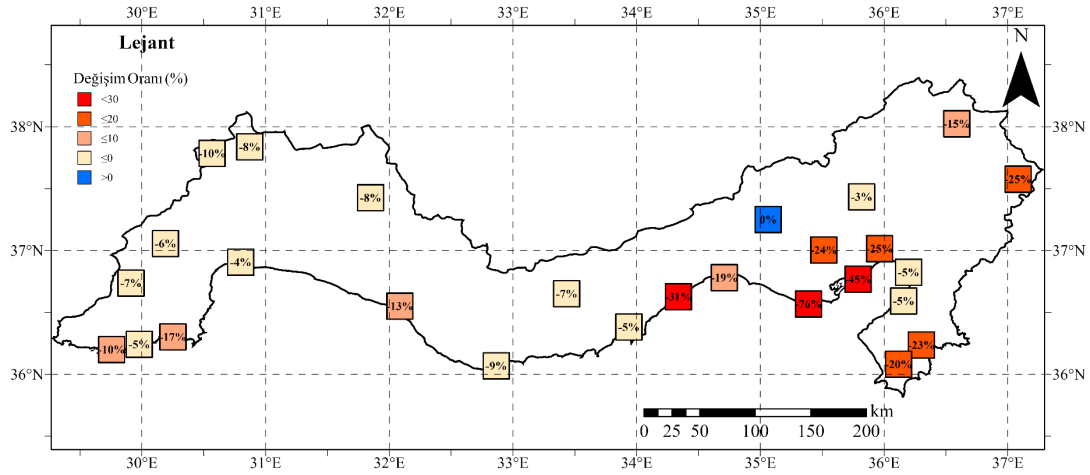
Yaz aylarında (haziran, temmuz, ağustos) ise yağış miktarlarında önemli bir değişim gözlenmemiştir. Haziran ayında, gözlem verilerine göre düşen aylık toplam yağış 19 mm iken, SSP2-4.5 senaryosunda bu 17 mm'ye, SSP5-8.5 senaryosunda ise 15 mm'ye düşmektedir. İlkbahar aylarında (mart, nisan, mayıs) gözlem yağışlarına göre, SSP2-4.5 senaryosunda her ayda ortalama 15 mm civarında, SSP5-8.5 senaryosunda ise ortalama 10 mm civarında azalış meydana gelmiştir.

Bu bulgular, Akdeniz Bölgesi'nde iklim değişikliğinin olası etkilerini ve özellikle kış ve sonbahar aylarında yağış miktarlarının azalabileceğini göstermektedir



Şekil 4. 14. İki SSP senaryosuna göre gelecek (2021-2100)'teki aylık ortalama toplam yağışın gözlem (1979-2020) verilerine değişim

Akdeniz Bölgesi'nde yapılan iklim projeksiyonları, orta kötümser senaryo (SSP2-4.5)'e göre yıllık toplam yağışlarda meydana gelecek değişimlerin mekânsal dağılımını Şekil 4.15'te göstermektedir. Bu haritada, bölgenin kıyı kesimlerinde yağış miktarlarında azalma oranları, diğer bölgelere kıyasla önemli farklılıklar göstermektedir. Bölgenin kıyı kesimlerinde batıda %5-17, doğuda %5-76, orta kesimde ise %5-13 arasında bir yağış azalması gözlemlenmektedir. Buna karşılık, genellikle dağlık olan kuzey bölgelerindeki yağışlarda meydana gelen azalma oranları batıda %6-10, orta bölümde %7 ve doğu bölümünde %1-25 arasında değişmektedir. İstasyon bazlı değerlendirme yapıldığında, en yüksek yağış azalması %76 ile doğu bölgesindeki Karataş istasyonunda gözlemlenmiştir.

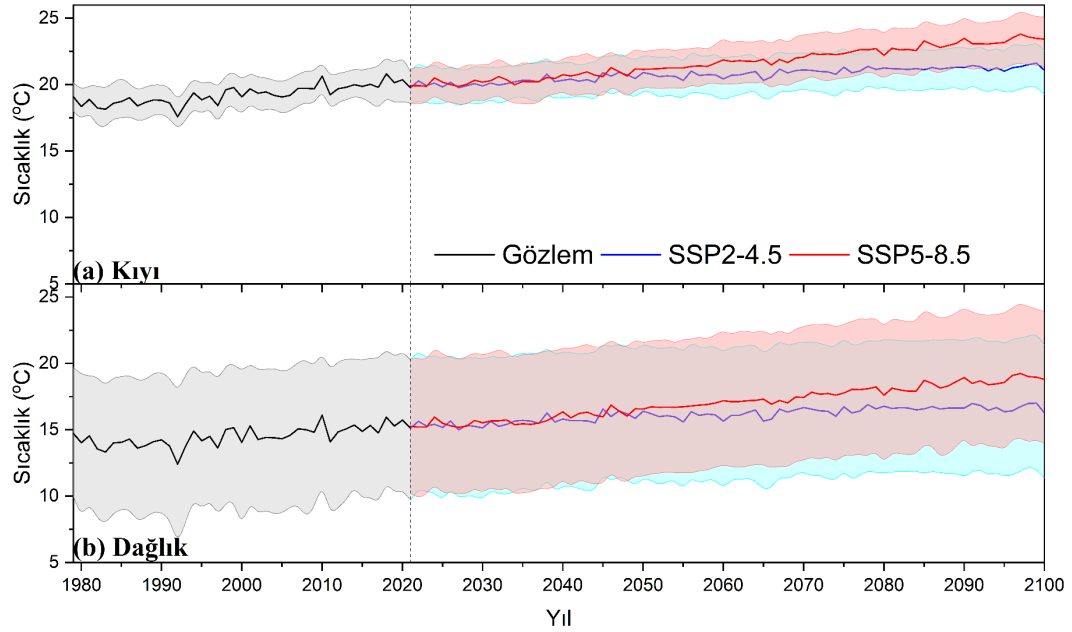


Şekil 4. 15. SSP2-4.5 senaryosu için 2021-2100 döneminde gözlem verilerine göre yıllık ortalama toplam yağış değişiminin mekânsal dağılımı (%)

Daha kötümser senaryo olan SSP5-8.5'e göre yapılan projeksiyonda ise, yağış azalma oranlarının SSP2-4.5 senaryosuna göre genellikle arttığı görülmektedir, bu durum Şekil 4.16'da verilmiştir. Bölgenin batı kıyı kesimlerinde yağış azalması %9-26, doğu kıyı bölgelerinde %6-73 ve orta bölümde %6-11 arasında değişmektedir. Dağlık bölgelerde ise batıda %9-15, ortada %8-11 ve doğuda %10-31 arasında bir yağış azalması öngörülmektedir.



Bölgesi'nin farklı bölgelerinde iklim değişikliğinin sıcaklık üzerindeki etkilerinin hem şiddet hem de zamansal değişimler açısından farklı olabileceğini göstermektedir.



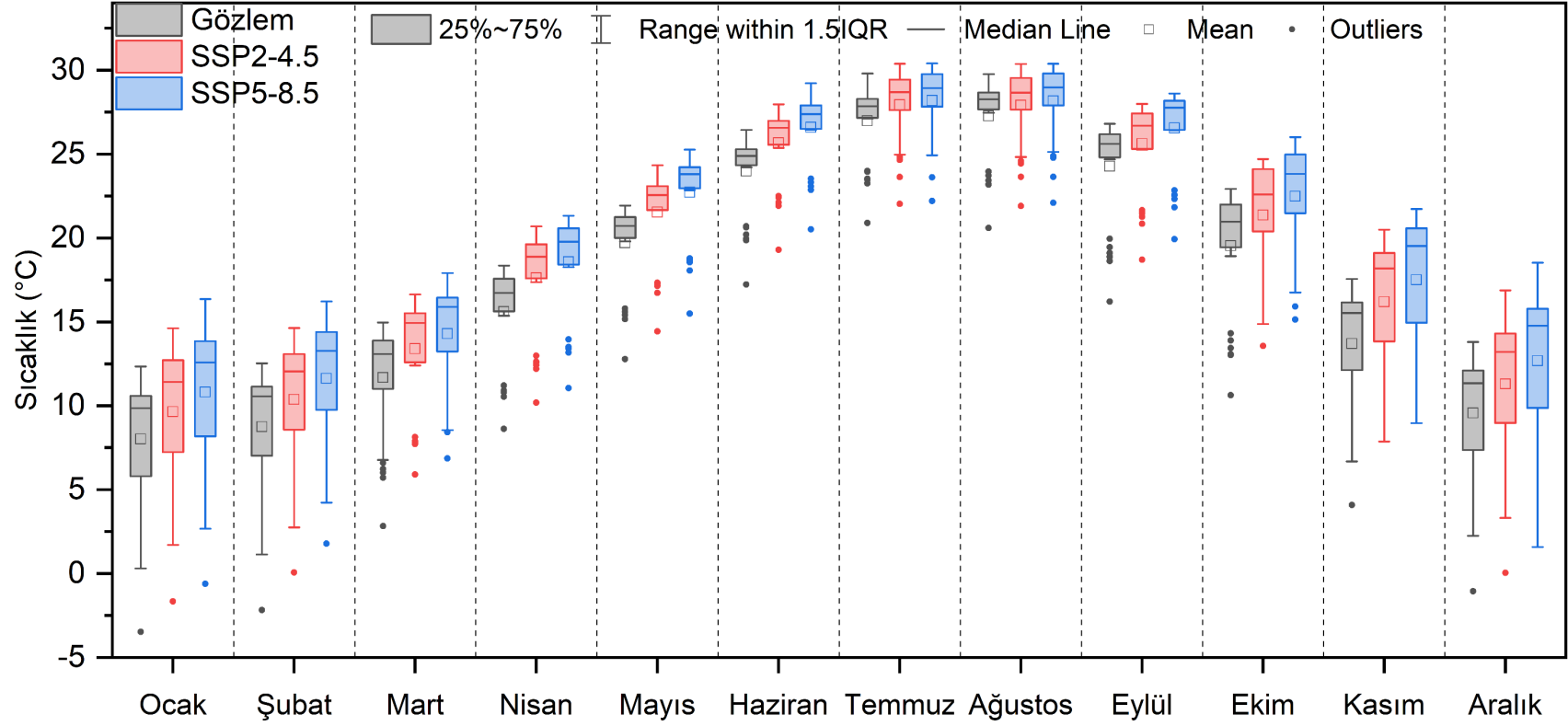
Şekil 4. 17. Sıcaklık değişiminin zamansal dağılımı a) Kıyı ve b) Dağlık bölge

Akdeniz Bölgesi'ndeki aylık bazdaki ortalama sıcaklık değerlerinde, her iki senaryo (SSP2-4.5 ve SSP5-8.5) altında, gözlem verilerine göre yapılan değerlendirmeler sonucunda belirgin bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Bu artış, Şekil 4.18'de açıkça görülmektedir. Bölgede, özellikle sonbahar aylarında aylık ortalama sıcaklıklardaki artışlar dikkat çekici boyutlardadır. Örneğin, eylül ayında, SSP2-4.5 senaryosunda gözlem verilerinin ortalamasına göre +1.35 °C, SSP5-8.5 senaryosunda ise 2.3 °C'lik bir artış öngörülmektedir. Ekim ayındaki sıcaklık artışı, SSP2-4.5 senaryosunda 1.82 °C, SSP5-8.5 senaryosunda ise 3 °C olarak tahmin edilmektedir. Kasım ayı, bölgede sıcaklık artışının en dikkat çekici olduğu aydır. Bu ayda SSP2-4.5 senaryosuna göre +2.5 °C, SSP5-8.5 senaryosuna göre ise +3.8 °C'lik artışlar gözlemlenmiştir.

Kış aylarında (aralık, ocak, şubat) da önemli sıcaklık artışları yaşanmış, bu artışlar SSP2-4.5 senaryosunda +1.6 °C, SSP5-8.5 senaryosunda ise +3 °C olarak tespit edilmiştir. İlkbahar aylarında (mart, nisan, mayıs) gözlemlenen sıcaklık artışları,

kış aylarındaki artışlara benzer şekildedir; SSP2-4.5 senaryosunda +1.85 °C, SSP5-8.5 senaryosunda yaklaşık +2.9 °C artış beklenmektedir. Yaz aylarında (haziran, temmuz, ağustos) ise her iki senaryoda da en düşük sıcaklık artışları gözlemlenmiş, bu artışlar SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryolarında sırasıyla +1.1 °C ve +1.6 °C olarak belirlenmiştir.



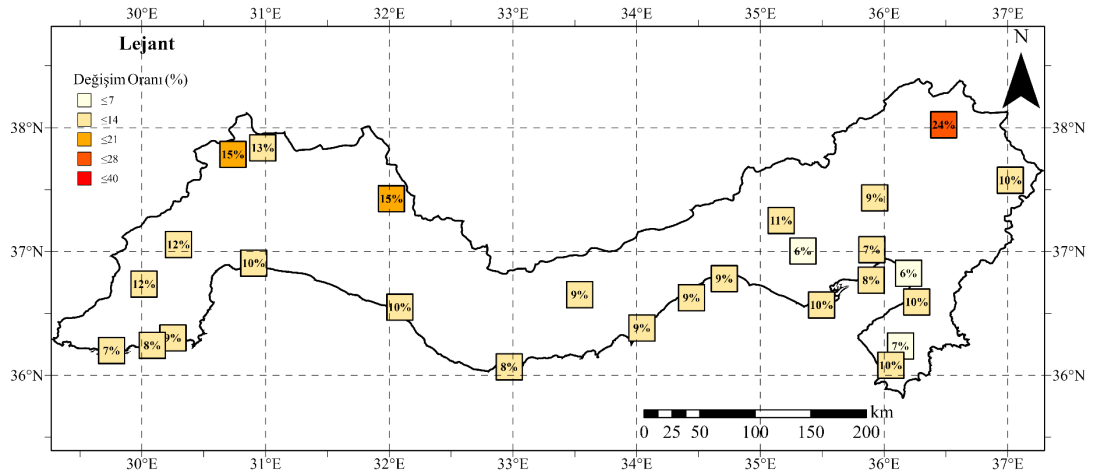


Şekil 4. 18. İki SSP senaryosuna göre gelecek (2021-2100)'teki aylık ortalama toplam sıcaklığın gözlem (1979-2020) verilerine değişimi

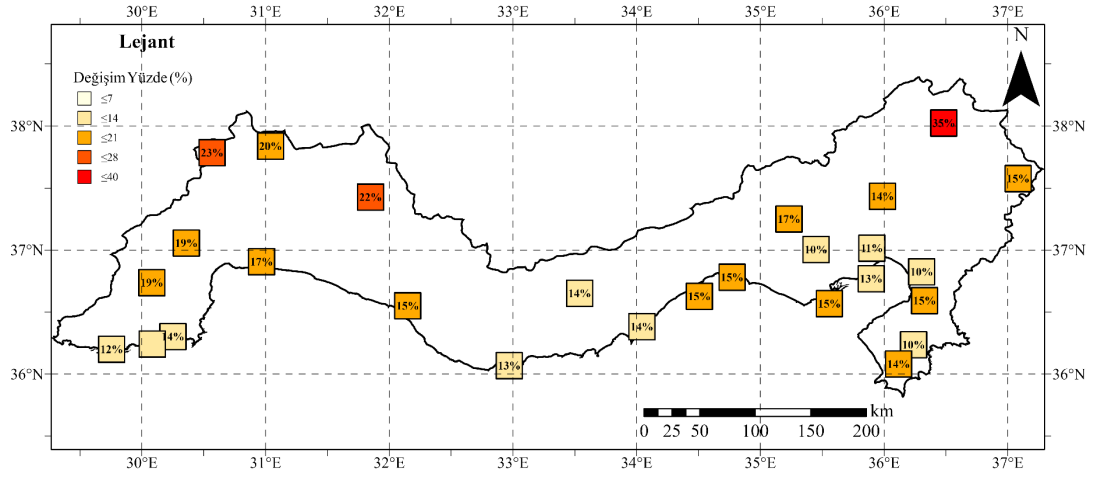
Akdeniz Bölgesi'nde yıllık ortalama sıcaklık değişiminin mekânsal dağılımı, SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryolarına göre Şekil 4.19. ve Şekil 4.20.'da yüzdesel cinsinden sunulmuştur. SSP2-4.5 senaryosuna göre, bölgenin kuzeyinde yer alan istasyonlarda yıllık ortalama sıcaklıkta meydana gelen artış %10 ile %24 arasında değişirken, kıyıya yakın güneydeki istasyonlarda bu artış %7 ile %12 arasındadır. SSP5-8.5 senaryosunda ise kuzeydeki istasyonlarda ortalama sıcaklık artışı %15 ile %35 arasında, güneydeki kıyı yakını istasyonlarda ise %10 ile %17 arasında değişmektedir.

Her iki senaryo incelendiğinde, yıllık ortalama sıcaklıkta daha yüksek rakımdaki istasyonlarda daha fazla sıcaklık artışı yaşanması beklenmektedir. Özellikle, 1342 metre rakımdaki Göksun istasyonunda sıcaklık artışının en yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bu istasyonda yıllık ortalama sıcaklıkta meydana gelen artış, SSP2-4.5 senaryosuna göre yaklaşık +2.2 °C (%24), SSP5-8.5 senaryosuna göre ise yaklaşık +3.1 °C (%35) olabileceği tahmin edilmektedir.

Bu analizler, Akdeniz Bölgesi'ndeki farklı coğrafi bölgelerin ve rakım seviyelerinin, iklim değişikliği bağlamında sıcaklık değişimlerine farklı şekillerde tepki verebileceğini göstermektedir.



Şekil 4. 19. SSP2-4.5 senaryosu için 2021-2100 döneminin gözlem verilerine göre yıllık ortalama sıcaklık değişiminin mekânsal dağılımı (%)



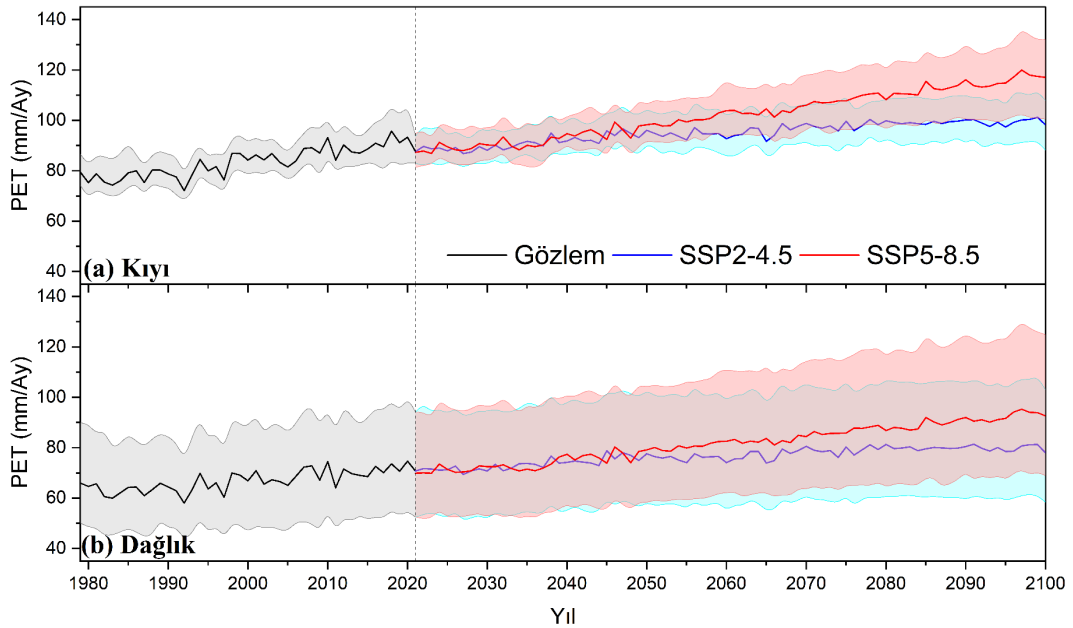
Şekil 4. 20. SSP5-8.5 senaryosu için 2021-2100 döneminin gözlem verilerine göre yıllık ortalama sıcaklık değişiminin mekânsal dağılımı (%)

#### 4.5. Meteorolojik Kuraklık Analizi

Bu bölümde, Akdeniz Bölgesi'nin meteorolojik kuraklık durumu, yağış ve sıcaklık için ayrı ayrı oluşturulan MME modellerine ait tarihi dönem ve gelecek iki farklı senaryo (SSP2-4.5 ve SSP5-8.5) için elde edilen yağış ve sıcaklık verileri kullanılarak incelenmiştir. Bu analizler, SPI ve SPEI kuraklık indeksleri ile gerçekleştirilmiştir.

##### 4.5.1. PET değerlerinin zamansal değerlendirilmesi

Bu bölümde, Akdeniz Bölgesi'nde meteorolojik kuraklık analizleri için gerekli olan PET değerleri, Thornthwaite yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. PET değerleri, yağış değerleri ile birlikte SPEI değerlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. PET değerlerinin hesaplanması için ortalama sıcaklık değerleri dikkate alınmış ve bu değerlerin zamansal dağılımları kıyı ve dağlık bölgeler için Şekil 4.21.'de sunulmuştur.



Şekil 4. 21. PET değerlerinin zamansal değişimi a) Kıyı, b) Dağlık bölge

Sıcaklığa bağlı olarak PET değerlerinin zamansal varyasyonları, gelecekte önemli değişiklikler göstermektedir. Örneğin, kıyı kesiminde tarihsel ortalama PET

değeri 83.44 mm/ay iken, SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryolarında sırasıyla 95 mm/ay ve 102 mm/ay'a yükselmektedir. Özellikle 2060-2100 yılları arasında bu değerlerin daha da yüksek olabileceği ve SSP5-8.5 senaryosunda 120 mm/ay'a ulaşabileceği öngörülmektedir. Ayrıca yüzyılın ortasından itibaren kıyı bölgesindeki iki senaryoya göre PET'lerin değişimini gösteren eğrinin ayrışması dağlık kesime göre daha fazladır.

Yağış, sıcaklık ve PET değerlerinin projeksiyonları, 2060-2100 arasındaki değerlerin tarihsel verilerle oldukça farklı olduğunu göstermektedir. SPI ve SPEI yöntemleri, zaman serisinin ortalaması ve standart sapmasını kullanarak kuraklık indekslerini hesaplamaktadırlar. Temelde değerlerin ortalama değerden büyük olması ıslak, düşük olması ise kurak dönemi ifade etmektedir. Projeksiyon sonuçlarına göre, gelecekte yağış miktarlarının azalacağı ve PET değerlerinin önemli ölçüde artacağı öngörülmektedir. Bu durum, 1980-2100 yılları arasındaki zaman serisinde, son yıllardaki değişimlerin etkisinin daha belirgin olacağını göstermektedir. Bu çalışmada, zaman serilerinin değerlendirilmesinde farklı bir yaklaşımla, üç farklı zaman serisi oluşturulmuş ve bu seriler için kuraklık indeksleri hesaplanmıştır: 1) 1979-2021 tarihsel veriler, 2) Tarihsel veriler ve her senaryoya ait yakın gelecek projeksiyonları (1979-2021 ve 1979-2060), 3) Tarihsel veriler ve her senaryoya ait tüm projeksiyonlar (1979-2021 ve 1979-2100). Bu üç zaman serisi için kuraklıklar hesaplanmış ve ilk zaman serisi ile elde edilmiş kuraklık indislerinin 1979-2021'i, ikinci zaman serisi ile elde edilmiş indislerinin 2022-2060'ı ve üçüncü zaman serisi ile elde edilmiş indislerinin 2061-2100'ü tek bir kuraklık indis zaman serisi olarak birleştirilmiştir. Bu analizler, SPI ve SPEI yöntemlerine ait 3, 6 ve 12 aylık indeks değerlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır, böylece her değerlendirme, ilgili dönemi takiben geçerli olacaktır. Bu sayede, üç farklı analizin sonuçları tek bir çalışmada değerlendirilebilir.

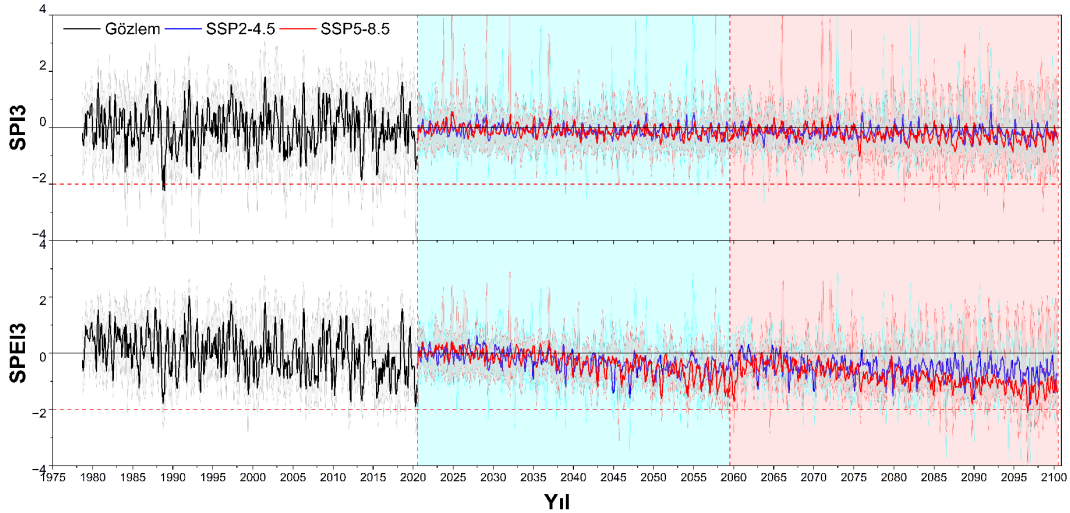
#### 4.5.2. Kuraklığın zamansal değerlendirmesi

Bu bölümde, Akdeniz Bölgesi'nin kıyı ve dağlık bölgelerindeki kuraklık durumunun zamansal değişimi, farklı zaman ölçekleri ve projeksiyon senaryoları altında detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Tarihi dönem (1980-2021), Yakın

Gelecek (2022-2060) ve Uzak Gelecek (2061-2100) olarak tanımlanan zaman aralıklarında, SPI ve SPEI yöntemleri kullanılarak kuraklık analizleri yapılmıştır.

Bu analizler, 3 aylık periyotlar için Şekil 4.22 ve 4.23.'de, 6 aylık periyotlar için Şekil 4.24. ve 4.25.'te ve 12 aylık periyotlar için ise Şekil 4.26. ve 4.27.'da sunulmuştur. Bu şekillerde yer alan çizgiler, ilgili istasyonlardaki ortalama kuraklık indeksi değerlerini göstermekte, çizgilerin etrafındaki dolgulu alanlar ise minimum ve maksimum değer aralığını temsil etmektedir. Ayrıca, grafiklerdeki yatay kırmızı kesik çizgi, ekstrem kuraklık sınıf aralığının eşik değerini belirtmektedir.

Bu grafikler sayesinde, kuraklık indekslerinin bölgesel dağılımı ve gelecek projeksiyonlarına göre nasıl değiştiği izlenebilmektedir. Şekil 4.22. bölümünde ele alınan 3 aylık kuraklık indeks değerlerinin dağılımı, Akdeniz Bölgesi'nin kıyı kesimindeki kuraklık durumuna ışık tutmaktadır. SPI ve SPEI yöntemleriyle hesaplanan kuraklık indeksleri, tarihi dönemde ve gelecekteki senaryolarda bölgenin kuraklık durumunu farklı açılardan ele alarak önemli sonuçlar ortaya koymaktadır.



Şekil 4. 22. Kıyı bölgesi 3 aylık SPI-SPEI zamansal değişim grafiği

Tarihi dönemde kıyı bölgesindeki bazı istasyonlarda aşırı kuraklık (AK) durumu gözlemlenmişken, ortalama değerlere göre sadece bir yılda (Haziran 1989'da SPI için)

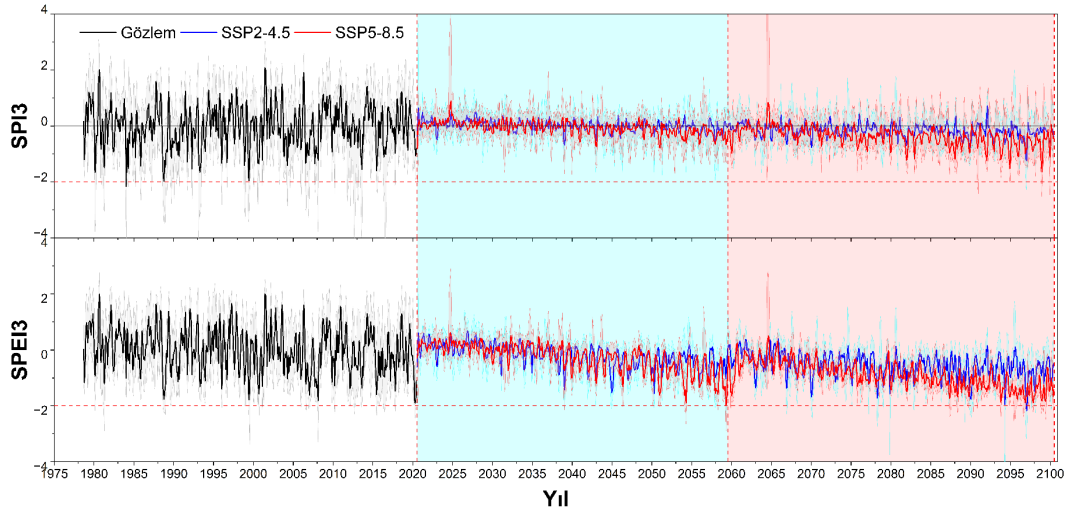
AK durumu meydana gelmiştir. Gelecek projeksiyonlarında, SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryoları altında 2021-2100 yılları arasında ortalama değerlere göre ekstrem kuraklık (ED) durumu gözlemlenmemiştir. Bu, bölgenin gelecek senaryolarında daha ılıman kuraklık koşullarının olabileceğine işaret etmektedir.

Özellikle dikkat çeken husus, SPI ve SPEI değerlerinin kuraklık durumlarını yansıtmadaki farklılıklarıdır. Tarihi dönemde SPEI, AK sınıfındaki kuraklıkları daha az belirlediği görülmüşken, gelecek projeksiyonlarında kıyı bölgesi için Yakın Gelecek (YG) döneminde SPI'ye benzer bir yapı sergilese de Uzak Gelecek (UG) döneminde sıcaklık artışlarıyla kuraklık indeksleri farklılık göstermektedir.

Tarihi dönemde, SPI ve SPEI yöntemlerinin ortalama değerlerine göre, kuraklık oluşma yüzdesinin yaklaşık olarak %50 olduğu görülmektedir. Ancak, gelecek senaryolarında, özellikle SPEI yönteminde, YG ve UG dönemlerinde negatif değerlerin oranında önemli bir artış gözlemlenmektedir. SPEI'de SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryoları altında YG döneminin yaklaşık %80'inde ve UG döneminde neredeyse tüm zamanlarda negatif değerler görülmekte, bu da gelecekteki kuraklık riskinin artacağını göstermektedir.

Bölgenin dağlık kesimlerindeki 3 aylık kuraklık indekslerinin (SPI ve SPEI) değişimi Şekil 4.22.'te incelendiğinde, bölgede, tarihi dönem boyunca hiçbir istasyonda aşırı kuraklık durumu tespit edilmemiştir. Bu, dağlık bölgenin ortalama olarak daha düşük sıcaklıklara sahip olması ve bu koşullar altında yağışın daha düzenli dağılımıyla ilişkilendirilebilir.

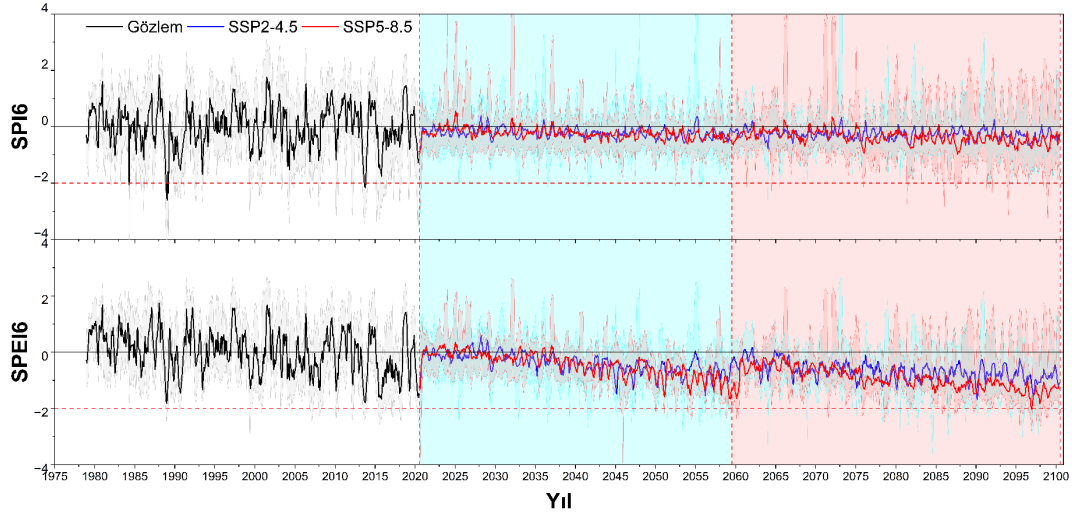
SPI değerlerinde, tarihi dönemde ve gelecek senaryolarında, kuraklık eğiliminin az olduğu görülmekte, ancak SPEI değerlerinde, YG ve UG dönemlerinde belirgin bir azalma görüldüğü ve neredeyse tamamının negatif olması dikkat çekmektedir. SPEI3 kuraklık indeksi, YG döneminde kıyı bölgelerine kıyasla dağlık bölgelerde daha düşük kuraklık oranlarına işaret etmektedir



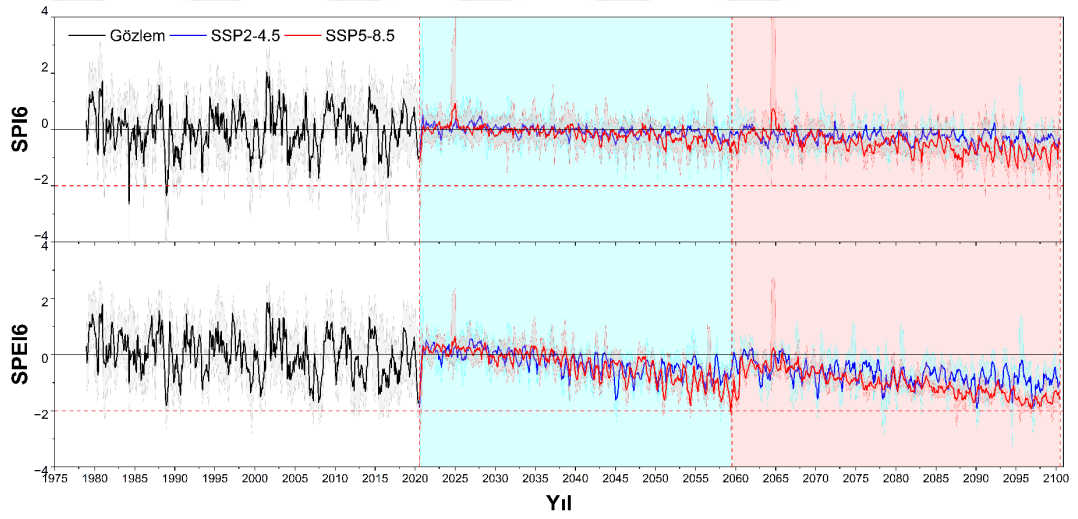
Şekil 4. 23. Dağlık bölgede 3 aylık SPI-SPEI zamansal değişim grafiği

Şekil 4.24. ve 4.25.'te yer alan 6 aylık indeks değerlerinin ve Şekil 4.26. ve 4.27.'da sunulan 12 aylık indeks değerlerinin analizi, 3 aylık indekslerle benzer, ancak daha belirgin bir eğilim ortaya koymaktadır. 6 aylık indekslerde, SPI değerlerinin gelecek dönemlerde negatif olma eğiliminin arttığı ve dağlık bölgelerdeki değişimin kıyı kesimlere göre daha az olduğu görülmektedir.

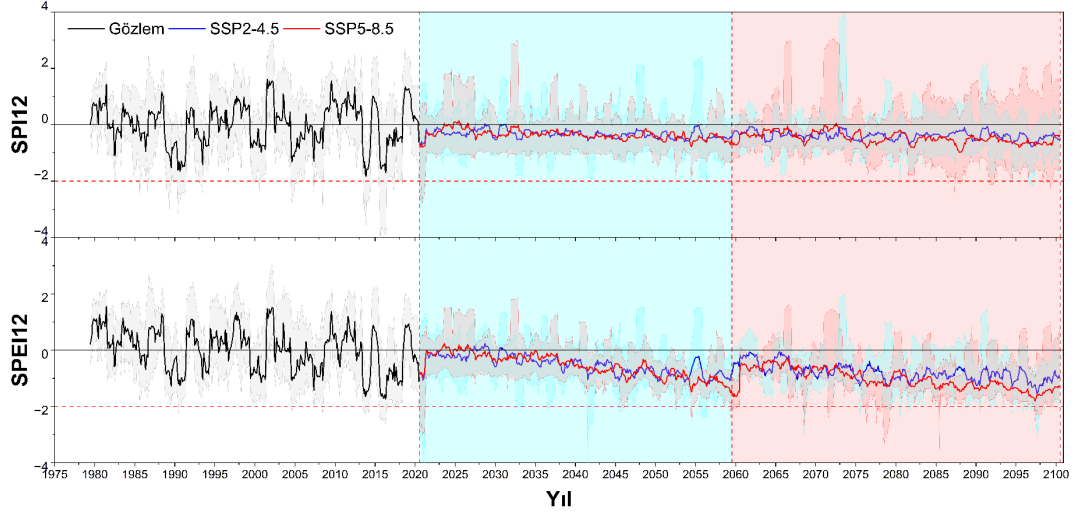
SPEI yöntemi ile hesaplanan 6 ve 12 aylık indeks değerleri hem YG hem de UG dönemlerinde, iki senaryo altında da azalma eğilimi göstermektedir. Bu azalma, dağlık bölgelerde daha belirgin olup, yağış azalması ve sıcaklık artışının birleştiği bu bölgelerde, kuraklık durumunun daha şiddetli yaşanabileceğine işaret etmektedir. Bölgenin tüm dağlık alanlarının benzer bir kuraklık durumu sergileyeceği, bu indeks değerlerinin ortalama olarak birbirine yakın olmasıyla gösterilmektedir.



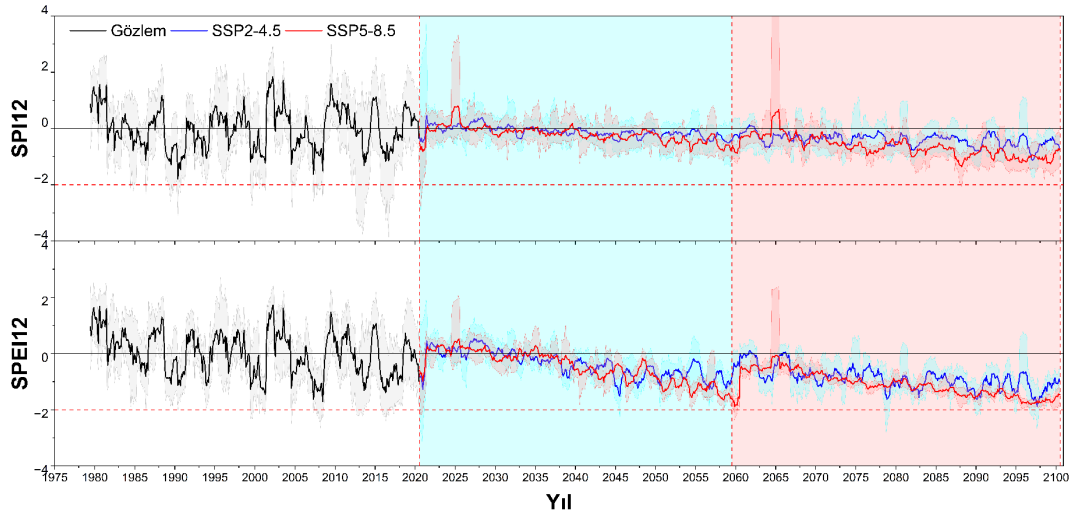
Şekil 4. 24. Kıyı bölgesi 6 aylık SPI-SPEI zamansal değişim grafiği



Şekil 4. 25. Dağlık bölgede 6 aylık SPI-SPEI zamansal değişim grafiği



Şekil 4. 26. Kıyı bölgesi 12 aylık SPI-SPEI zamansal değişim grafiği



Şekil 4. 27. Dağlık bölgede 12 aylık SPI-SPEI zamansal değişim grafiği

### 4.5.3. Kuraklığın eğilimi

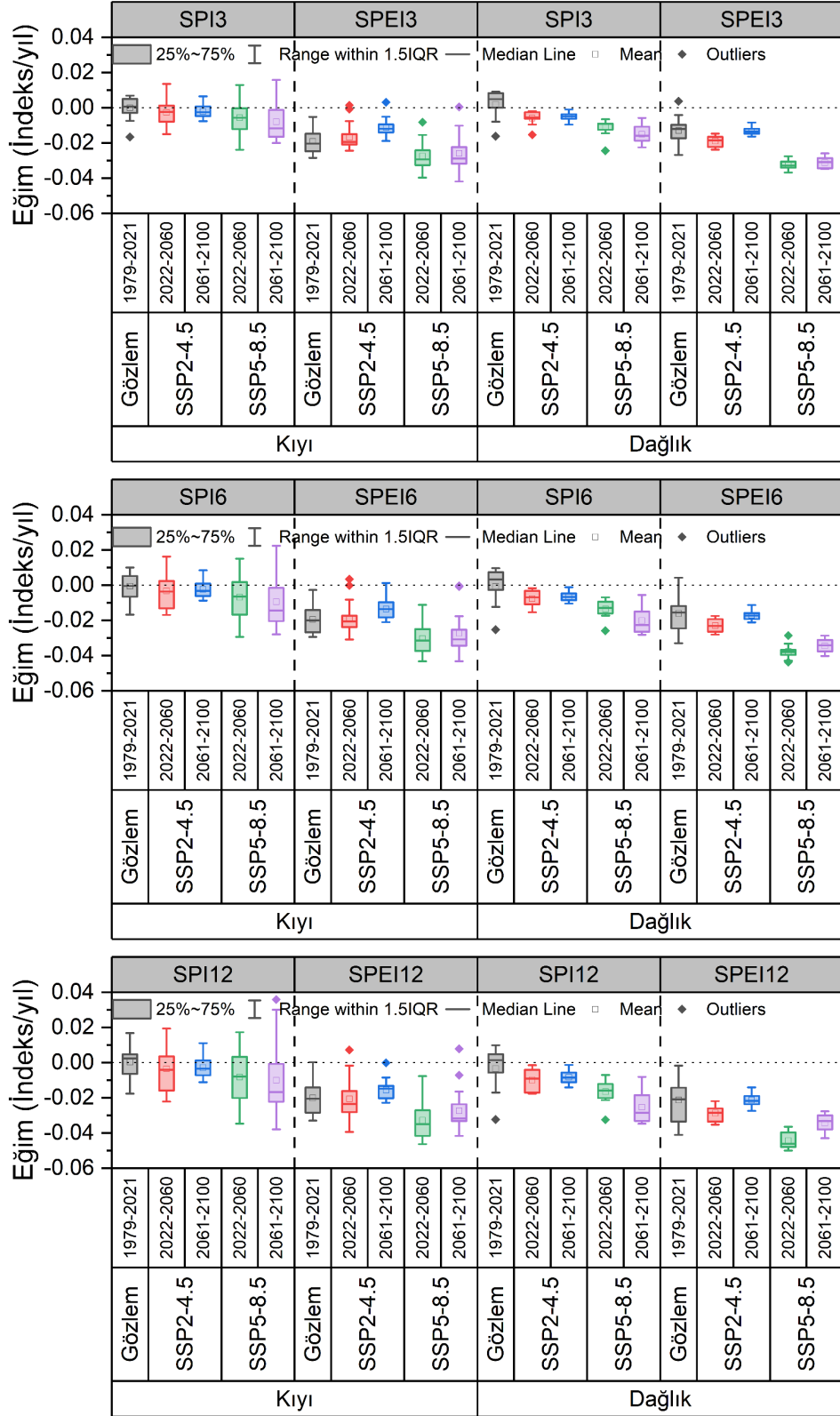
Çalışmanın bu bölümünde, Akdeniz Bölgesi'nin kıyı ve dağlık bölgelerinde, 3, 6 ve 12 aylık zaman ölçeklerine göre hesaplanmış SPI ve SPEI kuraklık indeks değerlerinin lineer trend eğim değerlerini içeren kutu grafikleri Şekil 4.28.'de ele alınmıştır. Her iki bölgedeki tüm istasyonlar için hesaplanan trend eğimleri, ilgili yılın indeks değerlerinin ortalamalarına dayanarak belirlenmiştir.

Kıyı bölgesindeki SPI değerlerinin dağılımı incelendiğinde, tarihi dönem ile SSP2-4.5 senaryosunun YG ve UG dönemleri arasında belirgin bir fark olmadığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, SSP5-8.5 senaryosunda negatif eğimin arttığı ve yıllık değişimin ortalama-0.01 civarında olduğu tespit edilmiştir.

Dağlık bölgedeki SPI değerlerinin eğimleri değerlendirildiğinde, tarihi dönemde SPI3 ve SPI6'da çoğunlukla pozitif olan eğimin gelecekte negatife dönüşerek SSP5-8.5 senaryosunun UG döneminde yıllık-0.02 değerine ulaştığı belirlenmiştir. Dağlık bölgede dikkat çeken diğer bir husus, SSP2-4.5 senaryosunda YG ile UG arasında önemli bir eğim farkı olmamasına karşın, SSP5-8.5 senaryosunda negatif eğim değerlerinin önemli ölçüde artış gösterdiğiidir.

Çalışmada incelenen SPEI indislerinin eğimleri, kıyı bölgesinde tarihi dönem için ortalama -0.02 olarak belirlenmiş, SSP2-4.5 senaryosunun YG dönemi için az bir değişim gösterirken, UG döneminde yaklaşık olarak-0.01'e düşeceği tespit edilmiştir. Bu, kıyı bölgesinde kuraklık şiddetinin azalabileceğine işaret etmektedir. Öte yandan, SSP5-8.5 senaryosu altında YG döneminde negatif eğimlerde önemli bir artış görülürken, UG döneminde YG'ye göre belirgin bir değişim olmayacağı değerlendirilmektedir.

Dağlık bölgedeki SPEI değerlerinde ise SPI'ye kıyasla eğimlerin çoğunlukla negatif olduğu ve SPEI3 ve SPEI6'da yaklaşık-0.01, SPEI12'de ise-0.02 değerlerine ulaştığı görülmektedir. SSP2-4.5 senaryosuna göre YG döneminde negatif eğimler bir miktar artarken, UG döneminde tarihi dönem değerlerine yakın bir eğim değeri hesaplanmıştır. Ancak, SSP5-8.5 senaryosunda eğim değerleri ciddi bir değişim göstererek yaklaşık -0.04 değerine ulaşmıştır. UG döneminde YG'ye göre önemli bir değişiklik tespit edilmemiştir. Bu durum, SSP5-8.5 senaryosuna göre YG'te kuraklık indislerinde önemli bir değişim olacağını ve bu senaryo altında kuraklığın yakın bir gelecekte ciddi şekilde şiddetlenebileceğini göstermektedir.

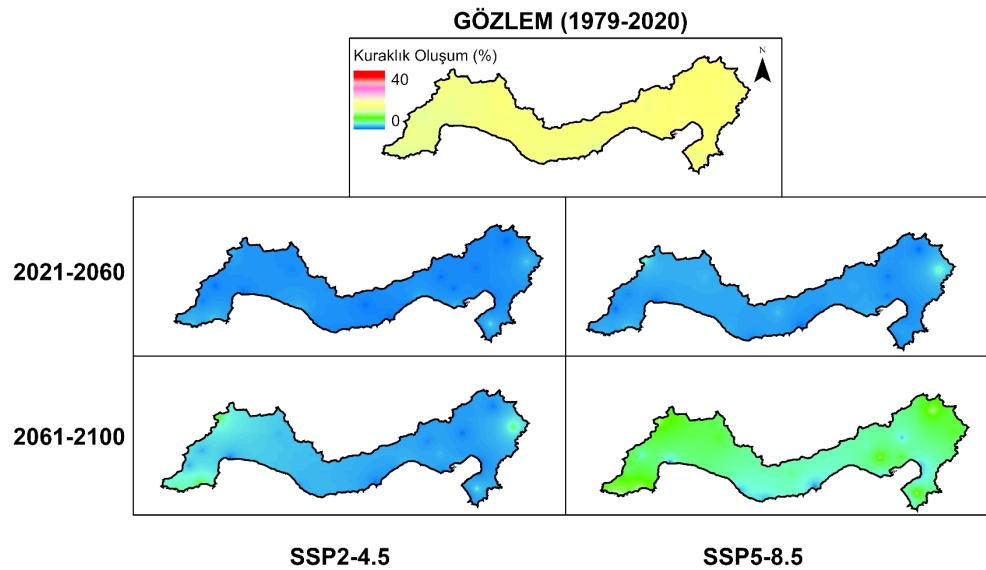


Şekil 4. 28. (a) SPI3-SPEI3, (b) SPI6-SPEI6 ve (c) SPI12-SPEI12 göre indeks eğiminin dağılımı

#### 4.5.4. Kuraklığın mekânsal değerlendirmesi

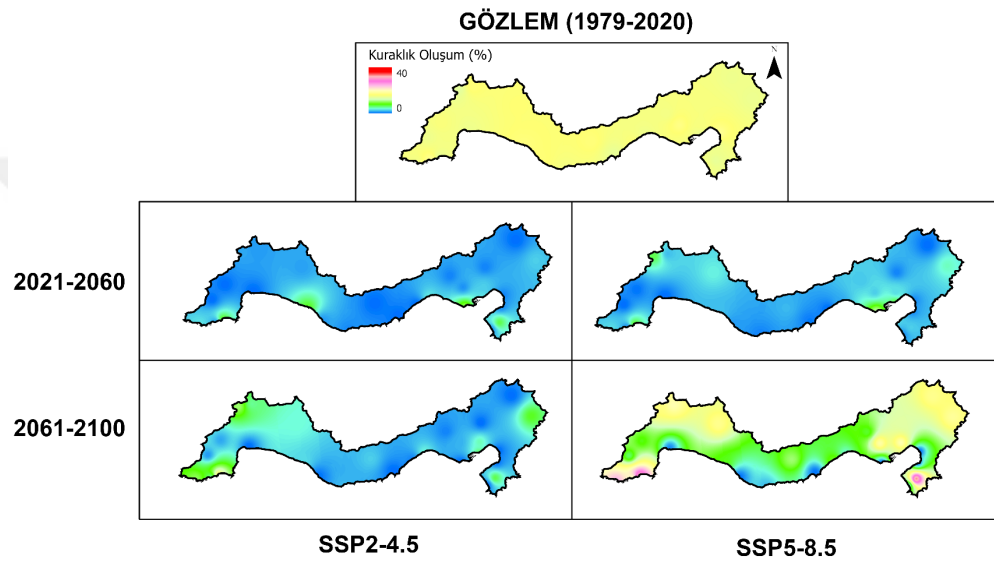
Bir önceki bölümde, geçmiş ve gelecekteki olası senaryolara göre kuraklıkların zamansal değişimleri incelenmişti. Bu bölümde ise kuraklık oluşumlarının mekânsal dağılımları ele alınmaktadır. Daha önce yapılan zamansal analizlerde, kuraklık oluşum yüzdesinin senaryolarda %90'ları aştığı tespit edilmişti. Ancak bu oranların yüksekliği, sağlıklı bir değerlendirme yapmayı zorlaştırmaktadır. Bu nedenle mekânsal analizlerde, kuraklık indeks değerlerinin -1'den küçük olup olmadığına odaklanılarak bu durumun değişimi incelenmiştir. Bu yaklaşım, kuraklık riskinin bölgesel olarak nasıl değişebileceğine dair bir değerlendirme imkanı sunmaktadır.

SPI yöntemi kullanılarak, tarihsel dönem için ve iki farklı senaryo (SSP2-4.5 ve SSP5-8.5) altında kuraklık oluşum yüzdeleri, üç aylık zaman ölçeği (SPI3) bazında Şekil 4.29'da sunulmuştur. Bu grafikte, tarihi dönemde kuraklık oluşum yüzdesinin yaklaşık %16 olduğu görülmektedir. Gelecek dönemde, her iki senaryoya göre de kuraklık oluşum yüzdesinin azaldığı dikkat çekicidir. En kötümser senaryo olan SSP5-8.5 altında bile, UG döneminde kuraklık oluşum yüzdesinin %8'in altında kaldığı gözlemlenmekte ve bu veriler, gelecekte bölgedeki kuraklık riskinin azalabileceğine işaret etmektedir.



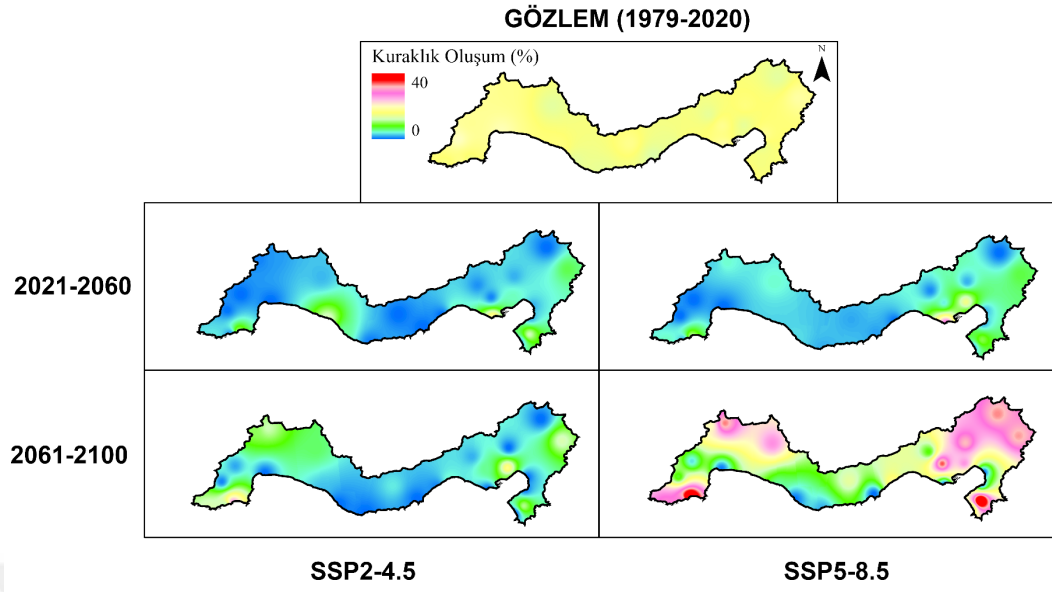
Şekil 4. 29. SPI3 için kuraklık oluşumunun mekânsal değişimi (%) (SPI<-1)

Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'da, SPI yöntemi kullanılarak SPI6 ve SPI12 göre tarihi dönem, SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryoları için hesaplanmış kuraklık oluşum yüzdeleri sunulmuştur. Bu haritalar incelendiğinde, tarihi dönemde her iki zaman serisinde kuraklık oluşum yüzdesinin yaklaşık %16 olduğu görülmektedir. Gelecek dönemde hem SPI6 hem de SPI12 için YG döneminde orta kuraklık ve daha şiddetli kuraklık oluşum yüzdelерinin azaldığı gözlemlenmektedir.



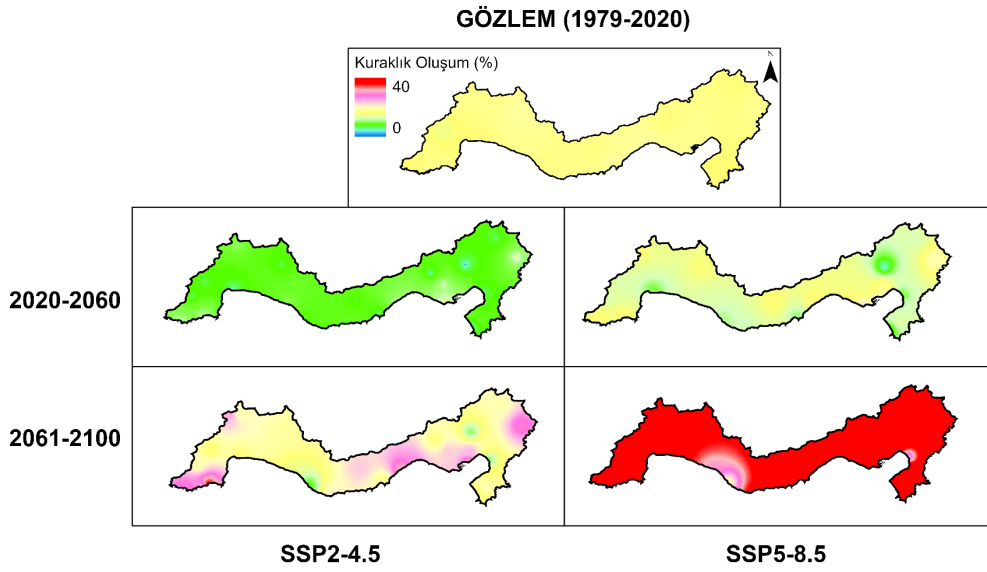
Şekil 4. 30. SPI6 için kuraklık oluşumunun mekânsal değişimi (%) (SPI<-1)

Her iki zaman serisinde(SPI6-SPI12) UG dönemlerinde, SSP2-4.5 senaryosuna göre kuraklık oluşum yüzdesinin tarihi döneme kıyasla azaldığı ve %8'in altında kaldığı görülmektedir. Öte yandan, SPI6 ve SPI12 göre SSP5-8.5 senaryosunda, UG'de kuzey dağlık bölgelerde ve güneydoğu ve güneybatı kısımlarındaki lokal bölgelerde tarihi döneme göre kuraklık oluşum yüzdelерinde bir artış olduğu belirlenmiştir. Bu artış, SPI6'ye göre SPI12' de gerek alansal olarak gerekse oluşum yüzdesi olarak daha fazladır.



Şekil 4. 31. SPI12 için kuraklık oluşumunun mekânsal değişimi (%) (SPI<-1)

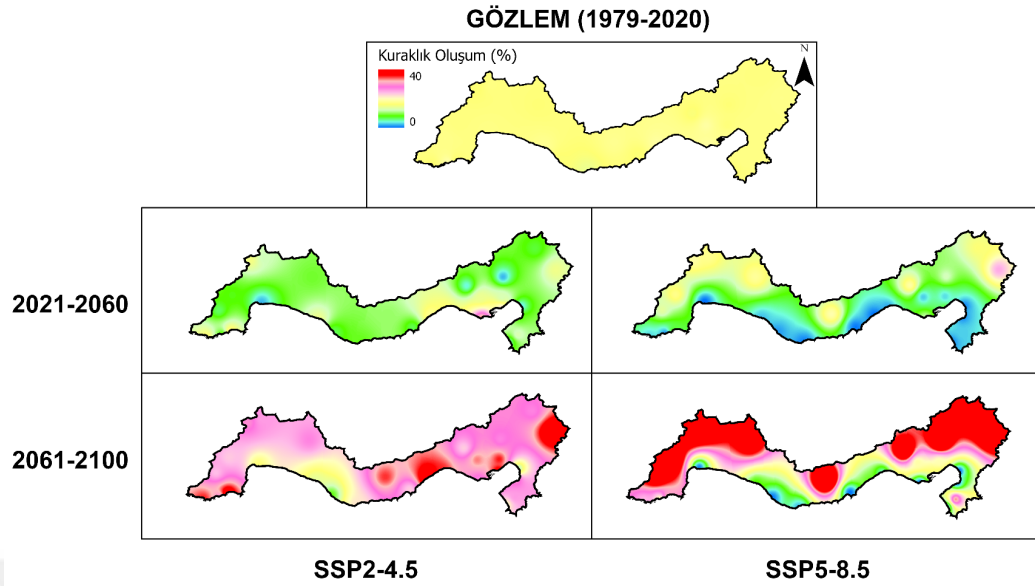
SPEI yöntemine göre hesaplanan kuraklık oluşum yüzdelerindeki değişim, SPI'ye göre farklılık göstermektedir. SPEI3 değerlerine bakıldığında, SSP2-4.5 senaryosu için YG döneminde kuraklık oluşum yüzdelerinin %8'lere kadar düşeceği görülmektedir. Ancak, UG döneminde, bölgenin bazı kısımlarında kuraklık oluşum yüzdelerinin %30'lara kadar çıkabileceği belirtilmektedir. Öte yandan, SPEI3 için SSP5-8.5 senaryosunun UG döneminde, havzanın neredeyse tamamında kuraklık oluşum yüzdelerinin %40'ı aşacağı görülmüştür.



Şekil 4. 32. SPEI3 için kuraklık oluşumunun mekânsal değişimi (%) (SPEI<-1)

SPEI6 zaman serisi sonuçlarına göre, hem SSP2-4.5 hem de SSP5-8.5 senaryolarında YG döneminde kuraklık oluşum yüzdelerinde tarihi döneme kıyasla önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Bu, her iki senaryoda da YG döneminde kuraklık koşullarının tarihsel döneme benzer bir seviyede devam edeceğini göstermektedir.

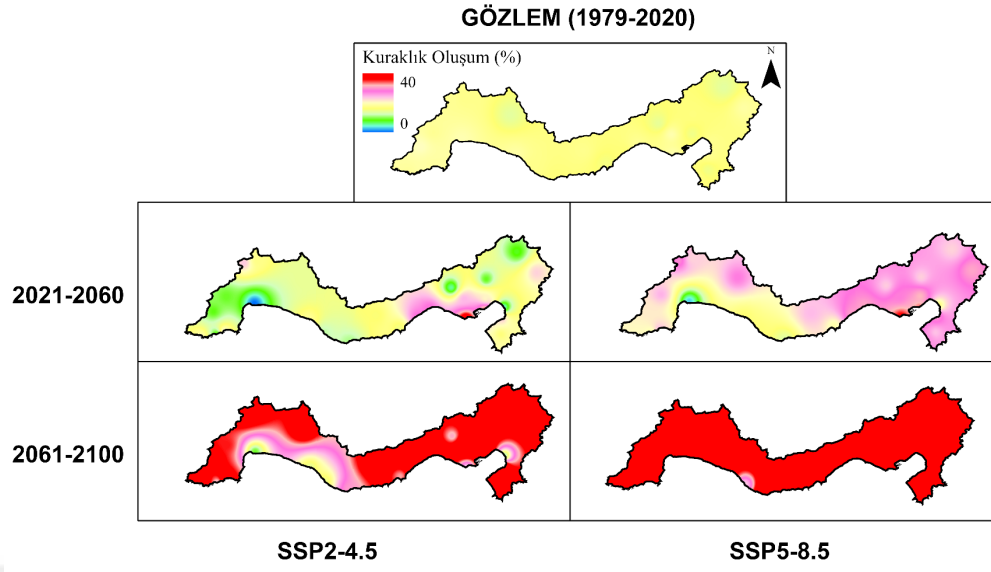
Çalışmada UG dönemine bakıldığında, SSP2-4.5 senaryosunda bölgenin kuraklık oluşum yüzdelerinin %30'lara varacağı, SSP5-8.5 senaryosunda ise, özellikle bölgenin kuzeyindeki dağlık alanlarda kuraklık oluşum yüzdelerinin %40'ları aşması beklenmektedir.



Şekil 4. 33. SPEI6 için kuraklık oluşumunun mekansal değişimi (%) (SPEI<-1)

SPEI12 kuraklık zaman serisine göre, SSP2-4.5 senaryosunda YG döneminde, özellikle güney doğu bölgelerinde, tarihi döneme kıyasla kuraklık oluşumlarında artış beklenmektedir. Diğer yandan, bölgenin genelinde bu dönemde önemli bir değişiklik öngörülmemektedir. Ancak, SSP5-8.5 senaryosunda YG döneminde, özellikle doğu Akdeniz bölgesinin kuzey alanlarında kuraklık oluşum yüzdelerinin %30'lara ulaşacağı beklenmektedir.

UG döneminde, hem SSP2-4.5 hem de SSP5-8.5 senaryolarına göre, bölgenin geniş bir bölümünde kuraklık oluşum yüzdelerinin %40'ın üzerinde olacağı tahmin edilmektedir. Bu durum, iklim değişikliğinin bölgedeki kuraklık risklerini önemli ölçüde artıracığını göstermektedir. Sonuçlar, yağışın kuraklığın ana belirleyicisi olmasına rağmen, sıcaklığın kuraklık hesaplamalarında dikkate alınmamasının, iklim değişikliğinin kuraklık üzerindeki etkilerini tam olarak yansıtamayacağını ortaya koymaktadır. Bu nedenle, gelecekteki kuraklık projeksiyon çalışmalarında hem yağış hem de sıcaklık parametrelerinin birlikte değerlendirilmesi önem taşımaktadır.



Şekil 4. 34. SPEI12 için kuraklık oluşumunun mekânsal değişimi (%) (SPEI<-1)

#### 4.6. Tartışma

Bu tez çalışması, Akdeniz bölgesindeki yağış ve sıcaklık değişimlerinin gelecekteki projeksiyonlarını, SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryoları çerçevesinde ele almaktadır. CMIP6'ya ait 22 küresel iklim modelinin (GCM) tarihi (1979-2015) ve gelecek dönem (2021-2100) çıktıları kullanılarak yapılan analizler, bölgenin meteorolojik kuraklık durumunun zamansal ve mekânsal değişimlerini ortaya koymaktadır. Çalışmada, regresyon yöntemlerinin aksine, iki veri seti arasındaki ilişkiyi doğrusal olmayan bir biçimde modelleyebilen YSA yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, GCM'lerin tarihi gözlem verilerini ne kadar başarıyla tahmin edebildiklerini farklı istatistiksel performans kriterleriyle değerlendirmek için tercih edilmiştir. Bu bağlamda, değişik performans kriterleri kullanılarak, tarihi yağış ve sıcaklık verilerini en iyi tahmin eden GCM'ler seçilmiş ve bu modellerin gelecekteki projeksiyonlarının daha gerçekçi olacağı varsayılmıştır. Değerlendirmede kullanılan kriterlere göre, GCM'lerin sıcaklık parametresini yağış parametresinden daha iyi modellediği anlaşılmıştır. Örneğin, sıcaklık için ortalama CC değeri 0,97 (NSE = 0,94) iken, yağış için bu değer 0,63 (NSE = 0,40) olarak belirlenmiştir. Bu değerlendirmede, Hassan ve ark. (2020) tarafından önerilen sınıflandırma kriterleri kullanılmıştır: NSE > 0.75 için model uygun ve iyi, 0.36 < NSE < 0.75 için model tatmin edici, ve NSE < 0.36 için model tatmin edici değildir. Bu kriterlere göre, GCM'lerin hem yağışı hem de sıcaklığı tahmin etme başarısının genel olarak tatmin edici olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmada, istatistiksel performans kriterleri aracılığıyla tahmin edilen ve gözlemlenen veriler arasındaki uyum ölçülmüştür. İstatistiksel performans kriterlerinin farklı doğruluk seviyeleri olabileceği göz önünde bulundurularak, bu kriterlerin birleşik bir değerlendirmesini sağlayan CRI değeri kullanılarak bölgeyi en iyi temsil eden GCM belirlenmiştir. CRI indeksi, farklı doğruluk seviyelerine sahip olan performans ölçümlerinin sonuçlarını tek bir metriğe birleştiren bir yöntemdir (Ahmed ve ark., 2019a). Bu parametreye göre, CESM2-WACCM, Nor-ESM2-MM, MIROC6, CMCC-ESM2, CESM2 ve HadGEM3-GC31-LL modelleri, diğer GCM'lere kıyasla tarihsel yağış verilerini daha iyi simüle etmişlerdir. Sıcaklık verileri açısından ise, INM-CM5-0, CESM2-WACCM, FGOALS-g3 ve Nor-ESM2-MM

modelleri en başarılı ilk dört GCM olarak saptanmıştır. Yağış için en iyi altı GCM ile oluşturulan MME ve sıcaklık için en iyi dört GCM ile oluşturulan MME'nin, bölgeyi temsil etmede tek tek GCM'lerden daha üstün bir başarı gösterdiği tespit edilmiştir. Bu bulgu, literatürde yer alan birçok çalışma ile desteklenmektedir (Iqbal ve ark., 2020; Dey ve ark., 2022; Gumus, 2023).

Bu çalışmada yapılan projeksiyonlara göre, Akdeniz bölgesinde her iki Senaryo Paylaşılan Sosyoekonomik Yollar (SSP2-4.5 ve SSP5-8.5) altında yağışlarda azalma ve sıcaklıklarda artış öngörülmektedir. Bölgede yıllık ortalama toplam yağış düşüş oranı SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryolarına göre sırasıyla yaklaşık %15 ve %20 olarak belirlenmiştir. Sıcaklık artışı ise SSP2-4.5 senaryosunda +1,0 ile +2,0 °C arasında, SSP5-8.5 senaryosunda ise +1,8 ile +3,1 °C arasında değişmektedir. Bu bulgular, bölgedeki önceki araştırmalarla uyumludur. Örneğin, Homsı ve ark. (2019) tarafından Suriye'de yapılan bir çalışmada, RCP4.5, 6.0, 8.5 senaryoları altında yağışların %30 ila %85 oranında azalabileceği öngörülmüştür. Majdi ve ark. (2022) tarafından yapılan bir başka çalışmada, Fas'tan İran'a kadar uzanan geniş bir coğrafi bölgede sıcaklıkların +0,8 ile +3 °C arasında artarken, yağışların 5 ila 133 mm arasında azalacağı belirtilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sıcaklık projeksiyonları, iç bölgelerdeki kuzey istasyonlarda sıcaklık artışlarının kıyı bölgelerine göre daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu, Gorguner ve ark. (2019) tarafından Türkiye'nin batı Ege bölgesindeki Gediz havzasında yapılan bir çalışma ile uyumludur. Burada, CMIP5 modelleri kullanılarak yapılan sıcaklık projeksiyonları, RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları altında yıllık ortalama sıcaklıkların +1,1 ile +2,1 °C arasında artacağını öngörmüştür.

Zhao ve Dai (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, SSP2-4.5 senaryosu altında Akdeniz bölgesinde yağışlarda %15 azalma, SSP5-8.5 altında ise %30 azalma öngörülmüştür. Bu sonuçlar, mevcut çalışma ile uyumludur. Ancak çalışmanın zaman aralığının sadece 2070-2099 yılları arasını kapsamaması, daha geniş bir zamansal çerçevede değerlendirmeleri sınırlamıştır.

Bağçacı ve ark. (2021) tarafından Türkiye genelinde CMIP5 ve CMIP6 modelleri kullanılarak yapılan kapsamlı bir iklim projeksiyonu çalışmasında, 21. yüzyılın sonlarına doğru Türkiye'nin güneybatı ve güney kesimlerinde %25'e varan bir kuraklık beklendiği belirtilmiştir. Bu çalışmada yeniden analiz verileri kullanılarak elde edilen sıcaklık değişimleri, SSP2-4.5 senaryosunda +2,5 °C olarak belirlenmişken, bu çalışmada SSP2-4.5 senaryosu altında maksimum sıcaklık değişimi +2,2 °C olarak hesaplanmıştır. SSP5-8.5 senaryosu altında ise aynı çalışmada +4,5 °C'lık bir sıcaklık artışı öngörülmüşken, bu çalışmada maksimum sıcaklık artışı +3,1 °C olarak belirlenmiştir. Bu çalışma, ölçülmüş istasyon verilerini temel alarak gerçekleştirilen bir projeksiyon çalışmasını sunmaktadır. Sonuçlar, yeniden analiz verileri kullanılarak yapılan gelecek projeksiyonlarının, ölçülmüş verilerle yapılan projeksiyonlardan önemli farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu farklılıklar, iklim değişikliğinin etkilerini anlamak ve gelecek projeksiyonlarını doğru bir şekilde yapmak için ölçülmüş verilerin önemini vurgulamaktadır.

Akdeniz havzası ile alakalı yapılmış önceki çalışmaların (Zittis ve ark., 2019; Babaousmail ve ark., 2022; Cos ve ark., 2022; Mesta ve ark., 2022) çoğunlukla yaz ve kış mevsimlerine odaklanmışlardır. Ancak bu çalışmanın sonuçları, sonbahar ve ilkbahar aylarındaki sıcaklık ve yağış değişimlerinin de oldukça dikkate değer olduğunu göstermektedir.

Akdeniz havzası, coğrafi konumu nedeniyle üç kıtanın alt tropikal bölgelerini kapsamakta ve bu bölgelerin büyük bir kısmı yarı nemli, yarı kurak veya kurak iklim özelliklerine sahiptir (Koutroulis, 2019; Carvalho ve ark., 2022). Çalışma alanının bulunduğu Akdeniz havzasının güneydoğu bölgesi, çoğunlukla yarı kurak iklim özelliklerine sahiptir. 1980-2020 yılları arasındaki kuraklık indekslerinin eğilim çizgileri incelendiğinde, bölgede kuraklık frekanslarında ve büyüklüklerinde artan bir trend olduğu görülmektedir. Bu artış trendi, yağış miktarlarında meydana gelen azalma ve artan PET değerlerinin bir sonucu olarak değerlendirilebilir.

Bir bölgedeki yağışlardaki azalma ve sıcaklıklardaki artış, kuraklıkların sıklığında ve şiddetinde artışa neden olmaktadır. Bu bağlamda, Akdeniz bölgesi için

literatürde kuraklık sayısı ve sıklığının artacağına dair yaygın bir fikir birliği bulunmaktadır (Spinoni ve ark., 2020; Mirgol ve ark., 2021; Wang ve ark., 2021; Essa ve ark., 2023). Yapılan bu çalışmada, bölgede %15 ile %20 arasında olası yağış azalması ve sıcaklık artışlarına bağlı olarak, özellikle 2060-2100 yılları arasında kuraklık oluşumlarının önemli derecede artacağı öngörülmektedir. Spinoni ve ark. (2018), EURO CORDEX verilerini kullanarak, Avrupa'nın güneyindeki Akdeniz bölgesinin yakın ve uzak gelecekte, özellikle yakın gelecekte yaz kuraklıklarındaki artışlara ve uzak gelecekte bahar kuraklıklarına karşı savunmasız olduğunu vurgulamışlardır.

Spinoni ve ark. (2020) tarafından bir başka çalışmada, 103 adet RCM ve GCM ile yapılan kapsamlı gelecek projeksiyonunda, Akdeniz bölgesi için 2071-2100 yılları arasında yağışın %17 azalacağı ve sıcaklığın +2,3 °C artacağı belirtilmiştir RCP4.5 senaryosuna göre. RCP8.5 senaryosuna göre ise yağışta %8 azalma ve sıcaklıkta +4,5 °C artış öngörülmüştür. Bu çalışmanın sıcaklık projeksiyonları, Spinoni ve ark. (2020) sonuçlarıyla paralellik gösterirken, yağış projeksiyonları bazı farklılıklar içermektedir. Ayrıca, bu çalışmada yağış ve sıcaklık değişimleriyle birlikte, kuraklık frekanslarında ve sürelerinde meydana gelecek değişiklikler de değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelerde, buharlaşan nem talebi ve PET artışlarının kuraklık artışında önemli etkenler olduğu ifade edilmiştir. Bu bulgular, Akdeniz bölgesinin iklim değişikliklerinin etkilerine karşı savunmasız olduğunu ve bu değişikliklerin bölgenin hidrolojik dengesi üzerinde ciddi etkiler yaratabileceğini göstermektedir.

Akdeniz bölgesindeki çoraklaşmanın arttığı, Carvalho ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmada vurgulanmıştır. Çalışma, artan çoraklaşmanın ana sebebi olarak PET değerlerindeki artışı gösterirken, yağışlardaki azalmanın da önemli bir etken olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, bölgenin iklimsel olarak yarı nemli bölgelerinin gelecekte yarı kurak, yarı kurak bölgelerinin ise kurak bölgeye dönüşeceği öngörülmüştür. Koutroulis (2019) tarafından yapılan başka bir çalışmada, farklı ısınma senaryolarına bağlı olarak Güney Akdeniz havzasında PET'teki artışla birlikte yağıştaki azalmanın, kuraklıkların artmasına ve etki alanlarını genişlettiğini belirtilmiştir.

Coppola ve ark. (2021b) tarafından yapılan global ölçekteki kapsamlı bir başka çalışmada, Akdeniz havzasında kuraklık sayılarının hem CMIP5 modellerine göre hem de CMIP6 ve EURO-CORDEX modellerinin gelecek simülasyonlarına göre artacağı öngörülmüştür. Bu artışların özellikle uzak gelecekte daha belirginleşeceği vurgulanmıştır. Ancak, bu çalışmada yapılan projeksiyonların zamansal olarak sadece yakın ve uzak gelecek olarak filtrelenmesi, kuraklık ve diğer iklimsel parametrelerin değerlendirmesinin zamansal bütünlüğünü engellemiştir. Ayrıca, iklim değişikliğinin kuraklık frekansları üzerindeki etkisinin araştırılmasında sıcaklık artışlarının birinci dereceden etkilediği PET'leri hesaba katmayan SPI kuraklık indeksine göre yapılması, çalışmanın kuraklık frekans değerlendirmesinin gerçekçilikten uzaklaşmasına neden olmuştur.

Akdeniz bölgesi, yapılan çalışmaların genel değerlendirmesine göre, iklim değişikliğine karşı savunmasızdır. Giorgi (2006) ve Spinoni ve ark. (2018), hem yakın geçmişte hem de geleceğe yönelik tahminler açısından Güney Avrupa'nın 21. yüzyılın tamamı için bir kuraklık noktası olarak görüldüğünü doğrulamaktadır. Değişen iklime uyum, özellikle iklim değişkenliğine karşı önemli ölçüde kırılganlıkla karşı karşıya olan ve iklim değişikliğine eşlik eden sosyoekonomik şoklara hazırlıksız olan doğu ve güneydoğu Akdeniz'deki ülkeler için çok önemlidir (Abel ve ark., 2019). Ayrıca Ukkola ve ark. (2020) tarafından yapılan bir araştırmada, Akdeniz, güney ve batı Afrika ve güney Kuzey Amerika gibi yüksek nüfuslu ve su kıtlığı yaşanan bölgelerin gelecekte daha şiddetli kuraklıklar yaşayacağı öngörülmüştür.

Gelecekte kuraklık sıklığındaki değişimin, su kaynaklarının mevcudiyeti, arazi bozulması, tarımsal üretim, ekosistemler, biyolojik çeşitlilik kaybı ve ekonomik maliyetler üzerinde birçok etkisi olacaktır. Bu faktörler ve çevre yönetim kapasitesinin eksikliği, havzayı kuraklıklara karşı oldukça savunmasız kılmaktadır (Salehie ve ark., 2022a).

Bu bölgelerde beklenen kuraklık artışları, su ve gıda güvenliğini ciddi şekilde riske atabilir. Bu çalışma, kuraklık risklerinin artması ve bunların neden olabileceği

potansiyel etkileri üzerinde durarak, özellikle su kaynakları yönetimi ve gıda güvenliği konularında proaktif önlemler alınması gerektiğinin altını çizmektedir. Bu durum, su kaynakları ve gıda üretimi açısından zaten hassas olan bu bölgeler için ekstra bir zorluk oluşturmaktadır ve ilgili kurumların bu değişikliklere uyum sağlaması için çeşitli stratejiler geliştirmeleri gerekmektedir.



## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışma, Türkiye'nin Akdeniz Bölgesi'nde YSA tabanlı istatistiksel ölçek indirgeme yöntemi ile CMIP6 kapsamındaki 22 GCM modeli kullanarak SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryo çıktıları kullanılarak, 28 meteorolojik gözlem istasyonunun aylık toplam yağış ve aylık ortalama sıcaklık verilerinin gelecek projeksiyonları yapılmıştır. İstasyon bazlı ölçülen veriler ile model tahminleri arasındaki uyum, NSE, nRMSE, KGE, CC ve md gibi istatistiksel performans kriterleriyle değerlendirilmiştir. GCM'lerin istasyon bazlı performansları, bu performans kriterlerinin birleştirilmiş sonuçlarına dayanan CRI kriteriyle belirlenmiştir. En iyi performans gösteren modellerden, başarı performans kriterlerine göre, MME'ler oluşturulmuş ve bunlarla projeksiyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu projeksiyonlar verileri ile bölgenin 1979-2020 tarihi dönemi ve 2021-2100 gelecek dönemleri için meteorolojik kuraklık analizleri değerlendirilmiştir. Kuraklık oluşum durumları, SPI ve SPEI'nin 3, 6 ve 12 aylık zaman serileri için mekânsal ve zamansal analiz edilmiştir.

Çalışmada elde edilen ana bulgular aşağıda özetlenmiştir.

- GCM'ler, sıcaklık tahmininde yağışa göre daha iyi performans göstermiştir. Sıcaklık verilerinde gözlemlenen ile tahmin edilen veriler arasında korelasyon ortalama 0,97-0,98, yağışta ise korelasyon ortalama 0,60-0,63 bulunmuştur.
- Yağış tahmininde en iyi performansı CESM2-WACCM, Nor-ESM2-MM, MIROC6, CMCC-ESM2, CESM2 ve HadGEM3-GC31-LL modelleri gösterirken; sıcaklık tahmininde INM4-CM5-0, CESM2-WACCM, FGOALS-g3 ve Nor-ESM2-MM modelleri belirlenmiştir.
- Yağış için oluşturulan MME, en iyi altı GCM'den; sıcaklık için oluşturulan MME ise en başarılı dört GCM'den türetilmiştir. Her iki MME'nin bölgeyi temsil etmede bireysel GCM'lere göre daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.
- Bölge genelinde yıllık toplam yağışta meydana gelen değişim, SSP2-4.5 senaryosuna göre ortalama %15, SSP5-8.5 senaryosuna göre ise %20 civarında azalmaktadır. Her iki senaryo altında, bölgenin güneydeki kıyı kesimlerindeki

istasyonlarda kaydedilen yağış azalmaları, kuzeydeki istasyonlara kıyasla daha fazla olmaktadır.

- Bölgede özellikle sonbahar ve kış aylarında (eylül, ekim, kasım, aralık, ocak) meydana gelen yağışlardaki azalmalar, diğer aylara göre daha fazladır.
- Ortalama sıcaklıklarda meydana gelen artış, bölgenin kuzeyindeki istasyonlarda güney bölgesindeki istasyonlara göre daha fazladır.
- Bölge genelinde yapılan aylık ortalama sıcaklıktaki artış miktarının, SSP2-4.5 senaryosunda +1,0 ile +2,2 °C arasında, SSP5-8.5 senaryosunda ise +1,8 ile +3,1 °C arasında gerçekleşmesi öngörülmektedir.
- Yağış miktarları, incelenen iki senaryoda da azalmakta ve bu azalma özellikle UG'da daha belirgin hale gelmektedir. Kıyı bölgelerinde öngörülen yağış değişkenliği, dağlık bölgelere göre daha fazla olacaktır.
- Dağlık bölgedeki sıcaklık verilerinde meydana gelen değişimin, kıyı bölgesindeki değişimlere göre daha fazla olacağı beklenmektedir. Ayrıca, yağış ve sıcaklık değişimleri arasındaki fark, 2050 yılından sonra daha belirgin bir şekilde artmaktadır.
- Mevcut projeksiyon sonuçlarına göre, PET değerlerinin önemli ölçüde artacağı ve bu artışın, özellikle kıyı bölgesinde dikkate değer olacağı beklenmektedir. SSP5-8.5 senaryosuna göre, yüzyıl sonlarına doğru kıyı bölgesinde PET değerlerinde meydana gelen artışın 120 mm/yıl'a ulaşacağı hesaplanmıştır.
- SPI ve SPEI endekslerine göre kuraklık oluşma yüzdeleri, 3, 6 ve 12 aylık zaman periyotları için benzer bir eğilim göstermektedir. Referans dönemde (1980-2015) bu oranlar yaklaşık olarak %50 civarında ve birbirine oldukça yakınken, gelecek zaman periyodunda, SPI değerlerinde hesaplanan kurak dönemde bir artış görülmesine rağmen, SPEI'deki artışlar daha belirgin olmaktadır. Özellikle SSP5-8.5 senaryosu altında, UG periyodunda neredeyse hiç pozitif SPEI indeksi değeri görülmemektedir.
- SPI kuraklık indis eğimleri incelendiğinde, SSP2-4.5'e göre pek önemli bir fark olmadığı ancak SSP5-8.5'te eğimin negatife döndüğü görülmüştür. Özellikle dağlık bölgedeki SPI değerlerinin eğimleri dikkate alındığında, referans dönem için SPI3 ve SPI6'da çoğunlukla pozitif olan eğimin, gelecekte

negatife döndüğü ve SSP5-8.5 senaryosuna göre UG'de bu negatif eğimin önemli bir artış gösterdiği belirlenmiştir.

- SPEI indeksine göre kuraklık eğimleri incelendiğinde, kıyı bölgesinde SSP2-4.5 senaryosuna göre, kuraklık şiddetindeki değişim az olup, gelecekte kuraklık şiddetinin azalacağı öngörülmektedir. Diğer yandan, SSP5-8.5 senaryosu altında, YG döneminde negatif eğimlerde ciddi bir artış gözlemlenmiştir. Ancak, UG döneminde, YG'ye göre önemli bir değişim gözlemlenmemiştir.
- Bölgedeki kuraklık frekansının mekânsal dağılımı, orta kuraklık ve üzeri ( $SPI/SPEI < -1$ ) oluşumlarına göre, SPI için, her iki senaryoda da bölgedeki kuraklık oluşumlarının azalacağı öngörülmektedir. Diğer yandan, SPEI için, sadece SSP2-4.5 senaryosuna göre YG döneminde SPEI3 indeksi altında kuraklık oluşumunun azaldığı hesaplanmıştır. Buna karşılık, SSP5-8.5 senaryosuna göre, SPEI3, SPEI6 ve SPEI12 indeksleri için, özellikle UG zaman diliminde kuraklık oluşumlarında önemli derecede bir artış gözlemlenmiştir. Bu değişimler, özellikle dağlık bölgelerde daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar, Akdeniz bölgesinde sıcaklık ve yağışlardaki değişikliklerin bölgenin iklim yapısını ciddi şekilde etkileyeceğini açıkça göstermektedir. Bölgenin yarı nemli ve yarı kurak iklim özellikleri, bu değişikliklerin etkisini daha da arttırabilir. Gelecekte, yağışlardaki düşüşler ve sıcaklıklardaki artışlar, kuraklıkların süresini ve şiddetini arttırabilecek önemli faktörlerdir. Akdeniz bölgesinin, gelecekte kuraklık açısından kırılgan bir durumda olacağı ve artan kuraklık riskinin ekosistemlere geri dönüşü olmayan zararlar verebileceği sonucuna varılmıştır.

Bu bağlamda, elde edilen projeksiyon sonuçları, Akdeniz'in küresel iklim değişikliği karşısında özellikle hassas bir bölge olduğunu göstermektedir. Bu durum, yerel halk, bilim insanları ve politika yapıcı topluluklar tarafından dikkate alınmalıdır. Kuraklık riski yüksek alanların etkin yönetimi ve su kaynaklarının dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Karar vericilerin, muhtemel senaryolara yönelik stratejiler geliştirmesi ve geleceğe dönük planlama yapması önem taşımaktadır.

İklim değişikliğinin atmosfer, hidrosfer ve biyosfer gibi birbiriyle sıkı bir bağlantıya sahip ekosistemleri etkileyeceği açıktır. Bu sistemlerde meydana gelecek değişimlerin küresel sağlık, ekonomi, tarım, enerji ve sosyo-kültürel alanlarda yaratacağı etkiler bilimsel bir çerçevede incelenmeli ve toplumsal bilinç oluşturulması için çaba sarf edilmelidir.



## KAYNAKLAR

- ABEL, G. J., BROTTTRAGER, M., CRESPO CUARESMA, J., and MUTTARAK, R., 2019. Climate, conflict and forced migration. *Global Environmental Change*, 54: 239-249.
- AGHAKOUCHAK, A., 2014. A baseline probabilistic drought forecasting framework using standardized soil moisture index: application to the 2012 United States drought. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(7): 2485-2492.
- AHMED, K., SACHINDRA, D. A., SHAHID, S., DEMIREL, M. C., and CHUNG, E.-S., 2019a. Selection of multi-model ensemble of general circulation models for the simulation of precipitation and maximum and minimum temperature based on spatial assessment metrics. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(11): 4803-4824.
- AHMED, K., SACHINDRA, D. A., SHAHID, S., IQBAL, Z., NAWAZ, N., and KHAN, N., 2020. Multi-model ensemble predictions of precipitation and temperature using machine learning algorithms. *Atmospheric Research*, 236.
- AHMED, K., SHAHID, S., NAWAZ, N., and KHAN, N., 2018. Modeling climate change impacts on precipitation in arid regions of Pakistan: a non-local model output statistics downscaling approach. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(1-2): 1347-1364.
- AHMED, K., SHAHID, S., SACHINDRA, D. A., NAWAZ, N., and CHUNG, E.-S., 2019b. Fidelity assessment of general circulation model simulated precipitation and temperature over Pakistan using a feature selection method. *Journal of Hydrology*, 573: 281-298.
- AJAYI, V. O., and ILORI, O. W., 2020. Projected Drought Events over West Africa Using RCA4 Regional Climate Model. *Earth Systems and Environment*, 4(2): 329-348.
- AKSOY, F., 2023. İklim Değişikliğinin Sosyoekonomik Etkilerinin Modellenmesini Geliştirmek İçin Bir Çerçeve. Uludağ Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Doktora Tezi, Bursa, 137s.
- ALMAZROUI, M., ISLAM, M. N., SAEED, F., SAEED, S., ISMAIL, M., EHSAN, M. A., DIALLO, I., O'BRIEN, E., ASHFAQ, M., MARTÍNEZ-CASTRO, D., CAVAZOS, T., CERESO-MOTA, R., TIPPETT, M. K., GUTOWSKI, W. J., ALFARO, E. J., HIDALGO, H. G., VICHOT-LLANO, A., CAMPBELL, J. D., KAMIL, S., RASHID, I. U., SYLLA, M. B., STEPHENSON, T., TAYLOR, M., and BARLOW, M., 2021. Projected Changes in Temperature and Precipitation Over the United States, Central America, and the Caribbean in CMIP6 GCMs. *Earth Systems and Environment*, 5(1): 1-24.
- ALMAZROUI, M., ISLAM, M. N., SAEED, S., SAEED, F., and ISMAIL, M., 2020a. Future Changes in Climate over the Arabian Peninsula based on CMIP6 Multimodel Simulations. *Earth Systems and Environment*, 4(4): 611-630.
- ALMAZROUI, M., SAEED, F., SAEED, S., NAZRUL ISLAM, M., ISMAIL, M., KLUTSE, N. A. B., and SIDDIQUI, M. H., 2020b. Projected Change in Temperature and Precipitation Over Africa from CMIP6. *Earth Systems and Environment*, 4(3): 455-475.

- ALPERT, P., KRICHAK, S. O., SHAFIR, H., HAIM, D., and OSETINSKY, I., 2008. Climatic trends to extremes employing regional modeling and statistical interpretation over the E. Mediterranean. *Global and Planetary Change*, 63(2-3): 163-170.
- ASADI ZARCH, M. A., 2022. Past and Future Global Drought Assessment. *Water Resources Management*, 36(13): 5259-5276.
- AVŞAROĞLU, Y., 2023. Dicle Havzası'ndaki Kuraklığın İki Değişkenli Kopula Teorisi ile Analizi Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Şanlıurfa, 116s.
- AYUGI, B., SHILENJE, Z. W., BABAUSMAIL, H., LIM KAM SIAN, K. T. C., MUMO, R., DIKE, V. N., IYAKAREMYE, V., CHEHBOUNI, A., and ONGOMA, V., 2022. Projected changes in meteorological drought over East Africa inferred from bias-adjusted CMIP6 models. *Natural Hazards*, 113(2): 1151-1176.
- BABAUSMAIL, H., HOU, R., AYUGI, B., SIAN, K. T. C. L. K., OJARA, M., MUMO, R., CHEHBOUNI, A., and ONGOMA, V., 2022. Future changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean and Sahara regions using bias-corrected CMIP6 models. *International Journal of Climatology*.
- BAĞÇACI, S. Ç., YUCEL, I., DUZENLI, E., and YILMAZ, M. T., 2021. Intercomparison of the expected change in the temperature and the precipitation retrieved from CMIP6 and CMIP5 climate projections: A Mediterranean hot spot case, Turkey. *Atmospheric Research*, 256.
- BEHZADI, F., YOUSEFI, H., JAVADI, S., MORIDI, A., SHAHEDANY, S. M. H., and NESHAT, A., 2022. Meteorological drought duration–severity and climate change impact in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(3-4): 1297-1315.
- BIBEROĞLU, E., 2017. Küresel İklim Modellerinin Yağış ve Sıcaklık Tahminlerinin İstatistiksel Ölçek İndirgemesi Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir, 112s.
- BOUWER, L. M., 2011. Have Disaster Losses Increased Due to Anthropogenic Climate Change? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(1): 39-46.
- BUSTOS USTA, D. F., TEYMOURI, M., and CHATTERJEE, U., 2021. Projections of temperature changes over South America during the twenty-first century using CMIP6 models. *GeoJournal*, 87(S4): 739-763.
- CARVALHO, D., PEREIRA, S. C., SILVA, R., and ROCHA, A., 2022. Aridity and desertification in the Mediterranean under EURO-CORDEX future climate change scenarios. *Climatic Change*, 174(3-4).
- CHEN, J., BRISSETTE, F. P., and LCONTE, R., 2011. Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *Journal of Hydrology*, 401(3-4): 190-202.
- CHEN, L., WANG, G., MIAO, L., GNYAWALI, K. R., LI, S., AMANKWAH, S. O. Y., HUANG, J., LU, J., and ZHAN, M., 2021. Future drought in CMIP6 projections and the socioeconomic impacts in China. *International Journal of Climatology*, 41(8): 4151-4170.
- COOK, B. I., MANKIN, J. S., MARVEL, K., WILLIAMS, A. P., SMERDON, J. E., and ANCHUKAITIS, K. J., 2020. Twenty-First Century Drought Projections in the CMIP6 Forcing Scenarios. *Earth's Future*, 8(6).

- COPPOLA, E., NOGHEROTTO, R., CIARLO, J. M., GIORGI, F., VAN MEIJGAARD, E., KADYGROV, N., ILES, C., CORRE, L., SANDSTAD, M., SOMOT, S., NABAT, P., VAUTARD, R., LEVAVASSEUR, G., SCHWINGSHACKL, C., SILLMANN, J., KJELLSTRÖM, E., NIKULIN, G., AALBERS, E., LENDERINK, G., CHRISTENSEN, O. B., BOBERG, F., SØRLAND, S. L., DEMORY, M. E., BÜLOW, K., TEICHMANN, C., WARRACH-SAGI, K., and WULFMEYER, V., 2021a. Assessment of the European Climate Projections as Simulated by the Large EURO-CORDEX Regional and Global Climate Model Ensemble. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(4).
- COPPOLA, E., RAFFAELE, F., GIORGI, F., GIULIANI, G., XUEJIE, G., CIARLO, J. M., SINES, T. R., TORRES-ALAVEZ, J. A., DAS, S., DI SANTE, F., PICHELLI, E., GLAZER, R., MÜLLER, S. K., ABBA OMAR, S., ASHFAQ, M., BUKOVSKY, M., IM, E. S., JACOB, D., TEICHMANN, C., REMEDIO, A., REMKE, T., KRIEGSMANN, A., BÜLOW, K., WEBER, T., BUNTEMEYER, L., SIECK, K., and RECHID, D., 2021b. Climate hazard indices projections based on CORDEX-CORE, CMIP5 and CMIP6 ensemble. *Climate Dynamics*, 57(5-6): 1293-1383.
- COS, J., DOBLAS-REYES, F., JURY, M., MARCOS, R., BRETONNIÈRE, P. A., and SAMSÓ, M., 2022. The Mediterranean climate change hotspot in the CMIP5 and CMIP6 projections. *Earth Syst. Dynam.*, 13(1): 321-340.
- ÇETINKAYA, İ., 2020. Assessment of Changes in Climate Indices of The Mediterranean Climate Region of Turkey. Middle East Technical University, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences, MSc, Ankara, 149s.
- ÇINER, A., and SARIKAYA, V. M. A., 2013. Buzullar ve İklim Değişikliği: Geçmiş, Günümüz ve Gelecek. ENİVA-Enerji ve İklim Değişikliği Vakfı: İstanbul; 20-58s.
- DABANLI, İ., 2017. Türkiye'de İklim Değişikliğinin Yağış-Sıcaklığa Etkisi ve Kuraklık Analizi: Akarçay Örneği. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 198s.
- DAI, A., 2010. Drought under global warming: a review. *WIREs Climate Change*, 2(1): 45-65.
- DANANDEH MEHR, A., SORMAN, A. U., KAHYA, E., and HESAMI AFSHAR, M., 2019. Climate change impacts on meteorological drought using SPI and SPEI: case study of Ankara, Turkey. *Hydrological Sciences Journal*, 65(2): 254-268.
- DEY, A., SAHOO, D. P., KUMAR, R., and REMESAN, R., 2022. A multimodel ensemble machine learning approach for CMIP6 climate model projections in an Indian River basin. *International Journal of Climatology*, 42(16): 9215-9236.
- DUBROVSKÝ, M., HAYES, M., DUCE, P., TRNKA, M., SVOBODA, M., and ZARA, P., 2013. Multi-GCM projections of future drought and climate variability indicators for the Mediterranean region. *Regional Environmental Change*, 14(5): 1907-1919.
- EL-MAHDY, M. E.-S., EL-ABD, W. A., and MORSI, F. I., 2021. Forecasting lake evaporation under a changing climate with an integrated artificial neural network model: A case study Lake Nasser, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 179.

- ESSA, Y. H., HIRSCHI, M., THIERY, W., EL-KENAWY, A. M., and YANG, C., 2023. Drought characteristics in Mediterranean under future climate change. *npj Climate and Atmospheric Science*, 6(1).
- EYRING, V., BONY, S., MEEHL, G. A., SENIOR, C. A., STEVENS, B., STOUFFER, R. J., and TAYLOR, K. E., 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5): 1937-1958.
- FARHAT, F., KASHIFI, M. T., JAMAL, A., and SABA, I., 2022. Spatiotemporal projections of precipitation and temperature over Afghanistan based on CMIP6 global climate models. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(3): 4229-4242.
- FU, R., WANG, C., MA, D., GU, H., XIE, Q., LIU, G., and YIN, G., 2023. Attribution of air temperature and precipitation to the future global drought events. *Environmental Research Communications*, 5(6).
- GIORGI, F., 2006. Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33(8).
- GIORGI, F., and LIONELLO, P., 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2-3): 90-104.
- GÓMEZ-NAVARRO, J. J., MONTÁVEZ, J. P., JEREZ, S., JIMÉNEZ-GUERRERO, P., and ZORITA, E., 2012. What is the role of the observational dataset in the evaluation and scoring of climate models? *Geophysical Research Letters*, 39(24).
- GORGUNER, M., KAVVAS, M. L., and ISHIDA, K., 2019. Assessing the impacts of future climate change on the hydroclimatology of the Gediz Basin in Turkey by using dynamically downscaled CMIP5 projections. *Science of The Total Environment*, 648: 481-499.
- GU, L., CHEN, J., YIN, J., SULLIVAN, S. C., WANG, H.-M., GUO, S., ZHANG, L., and KIM, J.-S., 2020. Projected increases in magnitude and socioeconomic exposure of global droughts in 1.5 and 2 °C warmer climates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(1): 451-472.
- GUMUS, V., 2023. Evaluating the effect of the SPI and SPEI methods on drought monitoring over Turkey. *Journal of Hydrology*, 626.
- GUMUS, V., and ALGIN, H. M., 2017. Meteorological and hydrological drought analysis of the Seyhan–Ceyhan River Basins, Turkey. *Meteorological Applications*, 24(1): 62-73.
- GUMUS, V., EL MOÇAYD, N., SEKER, M., and SEAID, M., 2023. Evaluation of future temperature and precipitation projections in Morocco using the ANN-based multi-model ensemble from CMIP6. *Atmospheric Research*, 292.
- GUO, H., BAO, A., CHEN, T., ZHENG, G., WANG, Y., JIANG, L., and DE MAEYER, P., 2021. Assessment of CMIP6 in simulating precipitation over arid Central Asia. *Atmospheric Research*, 252.
- HADI POUR, S., ABD WAHAB, A., SHAHID, S., and WANG, X., 2019. Spatial Pattern of the Unidirectional Trends in Thermal Bioclimatic Indicators in Iran. *Sustainability*, 11(8).
- HAILE, G. G., TANG, Q., HOSSEINI-MOGHARI, S. M., LIU, X., GEBREMICAEL, T. G., LENG, G., KEBEDE, A., XU, X., and YUN, X., 2020. Projected Impacts of Climate Change on Drought Patterns Over East Africa. *Earth's Future*, 8(7).

- HAMED, M. M., SAMMEN, S. S., NASHWAN, M. S., and SHAHID, S., 2022. Spatiotemporal variation of drought in Iraq for shared socioeconomic pathways. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(4): 1321-1331.
- HAO, Z., and SINGH, V. P., 2015. Drought characterization from a multivariate perspective: A review. *Journal of Hydrology*, 527: 668-678.
- HASSAN, I., KALIN, R. M., WHITE, C. J., and ALADEJANA, J. A., 2020. Selection of CMIP5 GCM Ensemble for the Projection of Spatio-Temporal Changes in Precipitation and Temperature over the Niger Delta, Nigeria. *Water*, 12(2).
- HEFFERNAN, O., 2016. The mystery of the expanding tropics. *Nature*, 530(7588): 20-22.
- HOMSI, R., SHIRU, M. S., SHAHID, S., ISMAIL, T., HARUN, S. B., AL-ANSARI, N., CHAU, K.-W., and YASEEN, Z. M., 2019. Precipitation projection using a CMIP5 GCM ensemble model: a regional investigation of Syria. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14(1): 90-106.
- IPCC, 2021. *Climate Change 2021 The Physical Science Basis. The Intergovernmental Panel on Climate Change the Sixth Assessment Report: 3949*, [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf) (Erişim Tarihi: 05-12-2021)
- IQBAL, Z., SHAHID, S., AHMED, K., ISMAIL, T., KHAN, N., VIRK, Z. T., and JOHAR, W., 2020. Evaluation of global climate models for precipitation projection in sub-Himalaya region of Pakistan. *Atmospheric Research*, 245.
- JI, Y., FU, J., LU, Y., and LIU, B., 2023. Three-dimensional-based global drought projection under global warming tendency. *Atmospheric Research*, 291.
- KAMRUZZAMAN, M., SHAHID, S., ISLAM, A. R. M. T., HWANG, S., CHO, J., ZAMAN, M. A. U., AHMED, M., RAHMAN, M. M., and HOSSAIN, M. B., 2021. Comparison of CMIP6 and CMIP5 model performance in simulating historical precipitation and temperature in Bangladesh: a preliminary study. *Theoretical and Applied Climatology*, 145(3-4): 1385-1406.
- KHAN, N., SHAHID, S., AHMED, K., ISMAIL, T., NAWAZ, N., and SON, M., 2018. Performance Assessment of General Circulation Model in Simulating Daily Precipitation and Temperature Using Multiple Gridded Datasets. *Water*, 10(12).
- KIRONO, D. G. C., ROUND, V., HEADY, C., CHIEW, F. H. S., and OSBROUGH, S., 2020. Drought projections for Australia: Updated results and analysis of model simulations. *Weather and Climate Extremes*, 30.
- KNUTTI, R., FURRER, R., TEBALDI, C., CERMAK, J., and MEEHL, G. A., 2010. Challenges in Combining Projections from Multiple Climate Models. *Journal of Climate*, 23(10): 2739-2758.
- KOUTROULIS, A. G., 2019. Dryland changes under different levels of global warming. *Science of The Total Environment*, 655: 482-511.
- LI, C., RAJ KATTEL, G., ZHANG, J., SHANG, Y., GNYAWALI, K. R., ZHANG, F., and MIAO, L., 2022. Slightly enhanced drought in the Yellow River Basin under future warming scenarios. *Atmospheric Research*, 280.
- LIN, C.-Y., and TUNG, C.-P., 2017. Procedure for selecting GCM datasets for climate risk assessment. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 28(1): 43-55.
- LIONELLO, P., MALANOTTE-RIZZOLI, P., BOSCOLO, R., ALPERT, P., ARTALE, V., LI, L., LUTERBACHER, J., MAY, W., TRIGO, R., TSIMPLIS,

- M., ULBRICH, U., and XOPLAKI, E., 2006. The Mediterranean climate: An overview of the main characteristics and issues. In *Mediterranean*. 1-26s.
- LUTZ, A. F., TER MAAT, H. W., BIEMANS, H., SHRESTHA, A. B., WESTER, P., and IMMERZEEL, W. W., 2016. Selecting representative climate models for climate change impact studies: an advanced envelope-based selection approach. *International Journal of Climatology*, 36(12): 3988-4005.
- MAJDI, F., HOSSEINI, S. A., KARBALAEI, A., KASERI, M., and MARJANIAN, S., 2022. Future projection of precipitation and temperature changes in the Middle East and North Africa (MENA) region based on CMIP6. *Theoretical and Applied Climatology*, 147(3-4): 1249-1262.
- MATHBOUT, S., MARTIN-VIDE, J., and BUSTINS, J. A. L., 2023. Drought characteristics projections based on CMIP6 climate change scenarios in Syria. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 50.
- MCKEE, T. B., DOESKEN, N. J., and KLEIST, J., The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 179-183.
- MESTA, B., SASAKI, H., NAKAEGAWA, T., and KENTEL, E., 2022. Changes in precipitation climatology for the Eastern Mediterranean using CORDEX RCMs, NHRCM and MRI-AGCM. *Atmospheric Research*, 272.
- MIRGOL, B., NAZARI, M., ETEDALI, H. R., and ZAMANIAN, K., 2021. Past and future drought trends, duration, and frequency in the semi-arid Urmia Lake Basin under a changing climate. *Meteorological Applications*, 28(4).
- MISHRA, A. K., and SINGH, V. P., 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2): 202-216.
- MISHRA, V., BHATIA, U., and TIWARI, A. D., 2020. Bias-corrected climate projections for South Asia from Coupled Model Intercomparison Project-6. *Scientific Data*, 7(1).
- MOHOBANE, T., MANTEL, S., and HUGHES, D. A., 2014. An assessment of the skill of downscaled GCM outputs in simulating historical patterns of rainfall variability in South Africa. *Hydrology Research*, 45(1): 134-147.
- MORIASI, D. N., ARNOLD, J. G., LIEW, M. W. V., BINGNER, R. L., HARMEL, R. D., and VEITH, T. L., 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3): 885-900.
- NACAR, S., 2020. İklim Değişikliğinin Doğu Karadeniz Havzası Sıcaklık Ve Yağış Parametreleri Üzerindeki Olası Etkilerinin İncelenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon, 309s.
- NACAR, S., KANKAL, M., and OKKAN, U., 2021. EraInterim Re-analiz Verileri Kullanılarak İstatistiksel Ölçek İndirgeme Yöntemi ile Doğu Karadeniz Havzası Aylık Ortalama Sıcaklık Değerlerinin Tahmin Edilmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*: 136-148.
- NASHWAN, M. S., and SHAHID, S., 2020. A novel framework for selecting general circulation models based on the spatial patterns of climate. *International Journal of Climatology*, 40(10): 4422-4443.
- NOOR, M., ISMAIL, T. B., SHAHID, S., AHMED, K., CHUNG, E.-S., and NAWAZ, N., 2019. Selection of CMIP5 multi-model ensemble for the projection of spatial and temporal variability of rainfall in peninsular Malaysia. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(1-2): 999-1012.

- NURI BALOV, M., and ALTUNKAYNAK, A., 2020. Spatio-temporal evaluation of various global circulation models in terms of projection of different meteorological drought indices. *Environmental Earth Sciences*, 79(6).
- O'NEILL, B. C., KRIEGLER, E., EBI, K. L., KEMP-BENEDICT, E., RIAHI, K., ROTHMAN, D. S., VAN RUIJVEN, B. J., VAN VUUREN, D. P., BIRKMANN, J., KOK, K., LEVY, M., and SOLECKI, W., 2017. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42: 169-180.
- OZTURK, T., CEBER, Z. P., TÜRKES, M., and KURNAZ, M. L., 2015. Projections of climate change in the Mediterranean Basin by using downscaled global climate model outputs. *International Journal of Climatology*, 35(14): 4276-4292.
- ÖZDEMİR, S., ÖZKAN, K., and MERT, A., 2020. Ekolojik Bakış Açısı İle İklim Değişimi Senaryoları. *Biological Diversity and Conservation*, 13(3): 361-371.
- PALMER, D. S., 1965. Sequencing Jobs Through a Multi-Stage Process in the Minimum Total Time—A Quick Method of Obtaining a Near Optimum. *Journal of the Operational Research Society*, 16(1): 101-107.
- PALMER, T. E., BOOTH, B. B. B., and MCSWEENEY, C. F., 2021. How does the CMIP6 ensemble change the picture for European climate projections? *Environmental Research Letters*, 16(9).
- PAVAN, V., and DOBLAS-REYES, F. J., 2000. Multi-model seasonal hindcasts over the Euro-Atlantic: skill scores and dynamic features. *Climate Dynamics*, 16(8): 611-625.
- PENALBA, O. C., and RIVERA, J. A., 2013. Future Changes in Drought Characteristics over Southern South America Projected by a CMIP5 Multi-Model Ensemble. *American Journal of Climate Change*, 02(03): 173-182.
- POYRAZ, A. Y., 2018. Drought Analysis Using Cordex Simulations Over The Mediterranean Climate Regions Of Turkey Middle East Technical University, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences, MSc, Ankara, 154s.
- RIAHI, K., VAN VUUREN, D. P., KRIEGLER, E., EDMONDS, J., O'NEILL, B. C., FUJIMORI, S., BAUER, N., CALVIN, K., DELLINK, R., FRICKO, O., LUTZ, W., POPP, A., CUARESMA, J. C., KC, S., LEIMBACH, M., JIANG, L., KRAM, T., RAO, S., EMMERLING, J., EBI, K., HASEGAWA, T., HAVLIK, P., HUMPENÖDER, F., DA SILVA, L. A., SMITH, S., STEHFEST, E., BOSETTI, V., EOM, J., GERNAAT, D., MASUI, T., ROGELJ, J., STREFLER, J., DROUET, L., KREY, V., LUDERER, G., HARMSSEN, M., TAKAHASHI, K., BAUMSTARK, L., DOELMAN, J. C., KAINUMA, M., KLIMONT, Z., MARANGONI, G., LOTZE-CAMPEN, H., OBERSTEINER, M., TABEAU, A., and TAVONI, M., 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42: 153-168.
- RIVERA, J. A., and ARNOULD, G., 2020. Evaluation of the ability of CMIP6 models to simulate precipitation over Southwestern South America: Climatic features and long-term trends (1901–2014). *Atmospheric Research*, 241.
- SACHINDRA, D. A., AHMED, K., SHAHID, S., and PERERA, B. J. C., 2018. Cautionary note on the use of genetic programming in statistical downscaling. *International Journal of Climatology*, 38(8): 3449-3465.

- SALEHIE, O., HAMED, M. M., ISMAIL, T. B., and SHAHID, S., 2022a. Projection of droughts in Amu river basin for shared socioeconomic pathways CMIP6. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(3-4): 1009-1027.
- SALEHIE, O., ISMAIL, T. B., HAMED, M. M., SHAHID, S., and IDLAN MUHAMMAD, M. K., 2022b. Projection of Hot and Cold Extremes in the Amu River Basin of Central Asia using GCMs CMIP6. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36(10): 3395-3416.
- SALMAN, S. A., SHAHID, S., ISMAIL, T., AHMED, K., and WANG, X.-J., 2018. Selection of climate models for projection of spatiotemporal changes in temperature of Iraq with uncertainties. *Atmospheric Research*, 213: 509-522.
- SARAF, V. R., and REGULWAR, D. G., 2016. Assessment of Climate Change for Precipitation and Temperature Using Statistical Downscaling Methods in Upper Godavari River Basin, India. *Journal of Water Resource and Protection*, 08(01): 31-45.
- SHARMA, S., HAMAL, K., KHADKA, N., ALI, M., SUBEDI, M., HUSSAIN, G., EHSAN, M. A., SAEED, S., and DAWADI, B., 2021. Projected Drought Conditions over Southern Slope of the Central Himalaya Using CMIP6 Models. *Earth Systems and Environment*, 5(4): 849-859.
- SHIRU, M. S., SHAHID, S., CHUNG, E.-S., ALIAS, N., and SCHERER, L., 2019. A MCDM-based framework for selection of general circulation models and projection of spatio-temporal rainfall changes: A case study of Nigeria. *Atmospheric Research*, 225: 1-16.
- SONG, Z., XIA, J., SHE, D., LI, L., HU, C., and HONG, S., 2021. Assessment of meteorological drought change in the 21st century based on CMIP6 multi-model ensemble projections over mainland China. *Journal of Hydrology*, 601.
- SPINONI, J., BARBOSA, P., BUCCHIGNANI, E., CASSANO, J., CAVAZOS, T., CHRISTENSEN, J. H., CHRISTENSEN, O. B., COPPOLA, E., EVANS, J., GEYER, B., GIORGI, F., HADJINICOLAOU, P., JACOB, D., KATZFEY, J., KOENIGK, T., LAPRISE, R., LENNARD, C. J., KURNAZ, M. L., LI, D., LLOPART, M., MCCORMICK, N., NAUMANN, G., NIKULIN, G., OZTURK, T., PANITZ, H.-J., PORFIRIO DA ROCHA, R., ROCKEL, B., SOLMAN, S. A., SYKTUS, J., TANGANG, F., TEICHMANN, C., VAUTARD, R., VOGT, J. V., WINGER, K., ZITTIS, G., and DOSIO, A., 2020. Future Global Meteorological Drought Hot Spots: A Study Based on CORDEX Data. *Journal of Climate*, 33(9): 3635-3661.
- SPINONI, J., VOGT, J. V., NAUMANN, G., BARBOSA, P., and DOSIO, A., 2018. Will drought events become more frequent and severe in Europe? *International Journal of Climatology*, 38(4): 1718-1736.
- SU, B., HUANG, J., GEMMER, M., JIAN, D., TAO, H., JIANG, T., and ZHAO, C., 2016. Statistical downscaling of CMIP5 multi-model ensemble for projected changes of climate in the Indus River Basin. *Atmospheric Research*, 178-179: 138-149.
- SU, B., HUANG, J., MONDAL, S. K., ZHAI, J., WANG, Y., WEN, S., GAO, M., LV, Y., JIANG, S., JIANG, T., and LI, A., 2021. Insight from CMIP6 SSP-RCP scenarios for future drought characteristics in China. *Atmospheric Research*, 250.

- SUPHARATID, S., and NAFUNG, J., 2021. Projected drought conditions by CMIP6 multimodel ensemble over Southeast Asia. *Journal of Water and Climate Change*, 12(7): 3330-3354.
- SZERSZYNSKI, B., and URRY, J., 2010. Changing Climates: Introduction. *Theory, Culture & Society*, 27(2-3): 1-8.
- ŞENER, E., 2021. Küresel İklim Değişikliğinin Eğirdir Gölü Havzasına Etkileri Ve Kuraklık Analizi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Isparta, 400s.
- ŞİMŞEK, O., SOYDAN OKSAL, N. G., UNCU, E. M., GÜMÜŞ, V., and ŞEKER, M., 2023. SYİ Yöntemiyle Çoruh Havzası Uzun Dönem (1969-2020) Meteorolojik Kuraklığının Analizi. *Journal of Polytechnic*.
- TABARI, H., and WILLEMS, P., 2022. Trivariate Analysis of Changes in Drought Characteristics in the CMIP6 Multimodel Ensemble at Global Warming Levels of 1.5°, 2°, and 3°C. *Journal of Climate*, 35(18): 5823-5837.
- THORNTHWAITE, C. W., 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1).
- TOMASZKIEWICZ, M. A., 2021. Future seasonal drought conditions over the CORDEX-MENA/Arab domain. *Atmosphere*, 12(7): 856.
- TUEL, A., and ELTAHIR, E. A. B., 2020. Why Is the Mediterranean a Climate Change Hot Spot? *Journal of Climate*, 33(14): 5829-5843.
- TÜRKEŞ, M., 2008. Küresel iklim değişikliği nedir? Temel kavramlar, nedenleri, gözlenen ve öngörülen değişiklikler. *İklim Değişikliği ve Çevre*, 1(1): 26-37.
- UKKOLA, A. M., DE KAUWE, M. G., RODERICK, M. L., ABRAMOWITZ, G., and PITMAN, A. J., 2020. Robust Future Changes in Meteorological Drought in CMIP6 Projections Despite Uncertainty in Precipitation. *Geophysical Research Letters*, 47(11).
- VICENTE-SERRANO, S. M., BEGUERÍA, S., and LÓPEZ-MORENO, J. I., 2010. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7): 1696-1718.
- WANG, T., TU, X., SINGH, V. P., CHEN, X., and LIN, K., 2021. Global data assessment and analysis of drought characteristics based on CMIP6. *Journal of Hydrology*, 596.
- WILBY, R. L., DAWSON, C. W., and BARROW, E. M., 2002. sdsms — a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17(2): 145-157.
- WILLMOTT, C. J., 2013. On the Validation of Models. *Physical Geography*, 2(2): 184-194.
- WU, G., CHEN, J., SHI, X., KIM, J. S., XIA, J., and ZHANG, L., 2022. Impacts of Global Climate Warming on Meteorological and Hydrological Droughts and Their Propagations. *Earth's Future*, 10(3).
- XIAN, T., XIA, J., WEI, W., ZHANG, Z., WANG, R., WANG, L.-P., and MA, Y.-F., 2021. Is Hadley Cell Expanding? *Atmosphere*, 12(12).
- XU, R., CHEN, N., CHEN, Y., and CHEN, Z., 2020. Downscaling and Projection of Multi-CMIP5 Precipitation Using Machine Learning Methods in the Upper Han River Basin. *Advances in Meteorology*, 2020: 1-17.
- YAVAŞLI, D. D., and ERLAT, E., 2023. Climate model projections of aridity patterns in Türkiye: A comprehensive analysis using CMIP6 models and three aridity indices. *International Journal of Climatology*, 43(13): 6207-6224.

- YEŞİLKÖY, S., and ŞAYLAN, L., 2022. Spatial and temporal drought projections of northwestern Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(1-2): 1-14.
- YILMAZ, M., ALP, H., TOSUNOĞLU, F., AŞIKOĞLU, Ö. L., and ERİŞ, E., 2022. Impact of climate change on meteorological and hydrological droughts for Upper Coruh Basin, Turkey. *Natural Hazards*, 112(2): 1039-1063.
- YOU, Q., ZHANG, Y., CHEN, C., GE, J., and ADNAN, M., 2018. Evaluation of Downscaled CMIP5 Coupled with VIC Model for Flash Drought Simulation in a Humid Subtropical Basin, China. *Journal of Climate*, 31(3): 1075-1090.
- YUAN, X., ZHANG, M., WANG, L., and ZHOU, T., 2017. Understanding and seasonal forecasting of hydrological drought in the Anthropocene. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21(11): 5477-5492.
- ZENG, J., LI, J., LU, X., WEI, Z., SHANGGUAN, W., ZHANG, S., DAI, Y., and ZHANG, S., 2022. Assessment of global meteorological, hydrological and agricultural drought under future warming based on CMIP6. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 15(1).
- ZHAI, J., MONDAL, S. K., FISCHER, T., WANG, Y., SU, B., HUANG, J., TAO, H., WANG, G., ULLAH, W., and UDDIN, M. J., 2020. Future drought characteristics through a multi-model ensemble from CMIP6 over South Asia. *Atmospheric Research*, 246.
- ZHAO, T., and DAI, A., 2021. CMIP6 Model-projected Hydroclimatic and Drought Changes and Their Causes in the 21st Century. *Journal of Climate*: 1-58.
- ZHOU, Z., ZHANG, L., CHEN, J., SHE, D., WANG, G., ZHANG, Q., XIA, J., and ZHANG, Y., 2023. Projecting Global Drought Risk Under Various SSP-RCP Scenarios. *Earth's Future*, 11(5).
- ZITTIS, G., HADJINICOLAOU, P., KLANGIDOU, M., PROESTOS, Y., and LELIEVELD, J., 2019. A multi-model, multi-scenario, and multi-domain analysis of regional climate projections for the Mediterranean. *Regional Environmental Change*, 19(8): 2621-2635.